



TESIS DE MÁSTER

Máster

INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y DE LA CONSTRUCCIÓN

TÍTULO

ENSAYO A ESCALA DE EDIFICIO DE DOS ALTURAS SOMETIDO A
DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES

Autor

LUCY LAURA LÁZARO LUNA

Tutor

ROLANDO CHACÓN
SERGIO OLLER

Intensificación

TECNOLOGÍA Y PROYECTO

Fecha

OCTUBRE DE 2015

El presente proyecto va dedicado a mis Padres Emilio y Lucila por su ejemplo y apoyo constante e incondicional, a mis hermanos Lisandro, Lizeth, Melany y Mirko por su gran cariño y a todos mis amigos.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad la aplicación de herramientas digitales de bajo costo para estudiar y comprender el comportamiento dinámico de estructuras de ingeniería civil; siendo el estudio de pórticos de corte uno de los más estudiados en el campo de la dinámica estructural.

Con esta finalidad se elaboró dos edificios simétricos de tres niveles, a escala reducida cada uno con propiedades geométricas y mecánicas diferentes.

Se ha realizado un análisis numérico de ambos edificios, utilizando elementos finitos. Se ha realizado tres análisis modales dinámicos: Frequency, para la determinación de frecuencias naturales del sistema; Modal Dynamic, para el cálculo de las respuestas estructurales frente a cargas dinámicas impuestas en la base; Steady State Dynamic, para el cálculo de respuestas máximas del estado estacionario para las frecuencias propias del sistema.

Se ha elaborado los modelos experimentales de ambos edificios y en ellos se ha desarrollado tres ensayos: vibración libre, vibración forzada y barrido de frecuencias. Para la medición de las respuestas estructurales se utilizó el hardware libre Arduino Uno y un acelerómetro ADXL 335.

Para la validación del modelo experimental, se comparó los resultados obtenidos del análisis numérico y el análisis experimental, las comparaciones hechas presentaron resultados de aproximación satisfactorios. Validado el modelo se realizó un análisis numérico de un edificio a escala real de hormigón armado, y se proponen futuras líneas de investigación.

INDICE

1. INTRODUCCION.....	7
1.1 INTRODUCCION	7
1.2 OBJETIVO	8
1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	8
2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	11
2.1 INTRODUCCIÓN	11
2.2 CONCEPTOS DE DINÁMICA ESTRUCTURAL	11
2.2.1 RESPUESTA DINÁMICA.....	12
2.2.2 GRADOS DE LIBERTAD	13
2.3 SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD	13
2.3.1 ECUACION DE MOVIMIENTO DE SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD.....	13
2.3.2 VIBRACIÓN LIBRE DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD.....	14
2.3.3 OSCILACIONES FORZADAS AMORTIGUADAS – ARMÓNICAS EN SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD	16
2.4 SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD	17
2.4.1 ECUACIONES DE MOVIMIENTO DE UN SISTEMA DE MULTIPLES GRADOS DE LIBERTAD	17
2.4.2 MATRIZ DE MASA Y AMORTIGUAMIENTO	18
2.4.3 MATRIZ DE RIGIDEZ.....	19
2.4.4 ECUACION DE EQUILIBRIO DINAMICO	19
2.4.5 VIBRACION LIBRE DE SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD	19
2.5 ENSAYOS EXPERIMENTALES EN ANÁLISIS DE DINAMICA DE ESTRUCTURAS	20
2.5.1 CONCEPTOS GENERALES - SHAKE TABLES	21
2.5.2 CONCEPTOS GENERALES – MODELOS REDUCIDOS.....	22
2.5.3 ARDUINO APLICADO A DINÁMICA ESTRUCTURAL	23
3 ESTUDIO DEL MODELO NUMÉRICO.....	25
3.1 INTRODUCCION.....	25
3.3 DEFINICIÓN DE UNIDADES	28
3.4 CARACTERIZACIÓN DEL MODELO - PREPROCESO	28
3.4.1 ELEMENTOS.....	28
3.4.2 PARTICULARIDADES DEL MODELO	32
3.4.3 CONDICIONES DE CONTORNO	33
3.5 ANALISIS DINÁMICO	33
3.5.1 ANALISIS FREQUENCY MODAL ANALYSIS.....	33
3.5.2 ANALISIS MODAL DYNAMICS ANALYSIS.....	37
3.5.3 ANALISIS STEADY STATE DYNAMICS, MODAL	48
4. ESTUDIO DEL MODELO EXPERIMENTAL	58

4.1	INTRODUCCIÓN.....	58
4.2	DESCRIPCIÓN DEL ENSAMBLAJE DEL EDIFICIO A ESCALA.....	59
4.2.1	EDIFICIO DE ALTURA H=10cm.....	59
4.2.2	EDIFICIO DE ALTURA H=18cm.....	64
4.3	DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	66
4.3.1	GENERADOR DE CARGAS	66
4.3.2	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN.....	68
4.4	PLAN DE ENSAYO	73
4.4.1	ENSAYO DE VIBRACIÓN LIBRE.....	73
4.4.2	VIBRACIÓN FORZADA	78
4.4.3	BARRIDO DE FRECUENCIAS	79
5.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS	83
5.1	INTRODUCCIÓN.....	83
5.2	ANALISIS FREQUENCY – VIBRACION LIBRE.....	84
5.3	MODAL DYNAMIC – VIBRACIÓN FORZADA.....	84
5.3.1	COMPARACION DE RESULTADOS PARA EDIFICIO DE H=10cm.....	84
5.3.2	COMPARACION DE RESULTADOS PARA EDIFICIO DE H=18cm.....	96
5.4	STEADY STATE DYNAMIC – BARRIDO DE FRECUENCIAS.....	100
5.4.1	COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA EDIFICIO H=10cm	100
5.4.2	COMPARACION DE RESULTADOS PARA EDIFICIO H=18cm	101
5.5	ANÁLISIS NUMÉRICO DE UN EDIFICIO A ESCALA REAL	103
5.5.1	GEOMETRÍA	103
5.5.2	MATERIALES	103
5.5.3	ANÁLISIS FREQUENCY – FRECUENCIAS PROPIAS.....	104
5.5.4	ANALISIS MODAL DYNAMIC.....	105
5.5.5	ANÁLISIS STEADY STATE DYNAMIC	107
6.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	108

CAPÍTULO I

INTRODUCCION

1. INTRODUCCION

1.1 INTRODUCCION

El estudio del comportamiento de edificios frente a acciones provocadas por algún tipo de carga dinámica, principalmente por cargas provenientes de la acción del sismo, representa uno de los problemas más estudiados en el análisis dinámico de estructuras.

El cálculo de los factores que caracterizan este fenómeno físico como, frecuencias propias del sistema y respuesta dinámica de la estructura, son algunos que se pueden mencionar para su estudio y determinación en los modelos numéricos planteados por diferentes autores, con metodologías particulares para su solución, extendida y accesible gracias al uso de ordenadores. Siendo la experimentación de modelos reducidos una manera de validar las soluciones numéricas estudiadas; esta experimentación se realiza muchas veces con instrumentación tradicional que genera costos elevados y para fines educativos dificulta su aplicación y uso correspondiente.

Por otro lado, las nuevas tecnologías que generalmente son aplicadas a los procesos de fabricación industrial, vienen siendo aplicadas a los procesos no solamente industriales ya que en estos tiempos gracias al desarrollo de herramientas digitales y accesibles por ser de bajo costo, es posible realizar diferentes procesos en actividades específicas. Estas herramientas se pueden clasificar en:

- La modelización digital en abierto: Diseño y manufactura asistida por computador.
- Existencia de plataformas abiertas de prototipo de hardware (electrónica abierta y software abierto), los cuales permiten integrar y digitalizar una amplia gama de sensores analógicos. Los datos digitales se pueden volcar en plataformas web y su gestión de datos puede derivarse en actuaciones físicas o digitales concretas.
- Gran accesibilidad de información abierta mediante internet.

Estas herramientas sumadas a la creatividad digital de muchos usuarios permiten la contribución de nuevos conocimientos de manera creciente.

Esta filosofía de herramientas abiertas y de creatividad digital orientadas a la dinámica estructural en el campo de la ingeniería civil hace que se pueda desarrollar modelos numéricos y experimentales, comprobar y validar las respuestas obtenidas sobre el comportamiento presentado por edificios sometidos a cargas provocadas por la acción del sismo y estudiar las propiedades dinámicas principales.

1.2 OBJETIVO

El objetivo principal del presente trabajo es el análisis numérico y experimental de un edificio tridimensional a escala reducida utilizando instrumentación de bajo costo.

Los objetivos específicos son:

- El análisis numérico de dos edificios tridimensionales a escala reducida con carga dinámica en su base, utilizando el software de elementos finitos ABAQUS 6.14.
- El análisis experimental de dos edificios tridimensionales a escala reducida y sometidos a movimiento en su base.
- Comparación y validación de resultados del análisis numérico y experimental.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El alcance del presente trabajo es el siguiente:

- El análisis de dos edificios simétricos de tres niveles a escala reducida con propiedades mecánicas y geométricas que difieren; el primero un edificio de altura entre forjados igual a 10cm el cual tiene por nomenclatura H=10cm y es considerado flexible por las propiedades mecánicas que presenta el material empleado; el segundo es un edificio de altura entre forjados igual a 18cm con nomenclatura H=18cm y considerado rígido por las propiedades que presenta el material empleado en su manufactura.

En base a este planteamiento el documento se organiza en:

- Capítulo II: Se presenta las bases teóricas para el análisis que se plantea.
- Capítulo III: El desarrollo de modelos numéricos para ambos edificios utilizando el software de elementos finitos Abaqus 6.14, en el cual se analizan tres procedimientos dinámicos elástico lineales denominados: Frequency, Modal Dynamic, Steady State Dynamic.
- Capítulo IV: El desarrollo experimental de los dos edificios utilizando para su manufactura la filosofía de herramientas abiertas accesibles y de bajo costo. Estos edificios están sometidos a cargas dinámicas armónicas en un grado de libertad de la base. Se realiza tres ensayos: vibración libre, vibración forzada y un barrido de frecuencias.
- Capítulo V: La comparación de los resultados obtenidos en el análisis numérico y en el análisis experimental.
- Capítulo VI: Se desarrolla por último las conclusiones de todo el trabajo que se presenta.

Para un mejor entendimiento se presenta el siguiente esquema explicativo del desarrollo del trabajo:

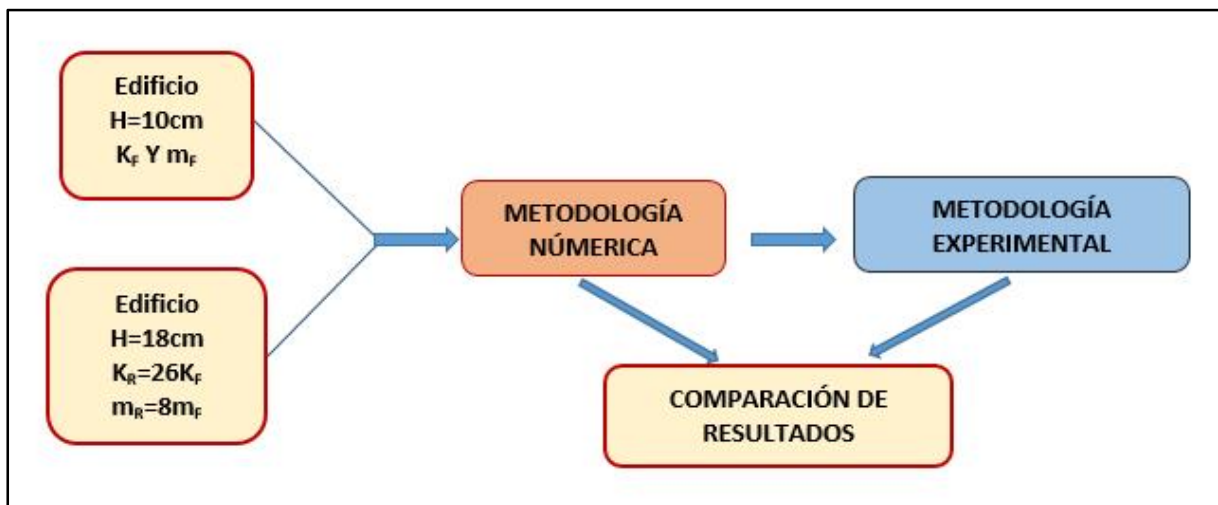


Figura 1.1: ESQUEMA GENERAL DEL TRABAJO

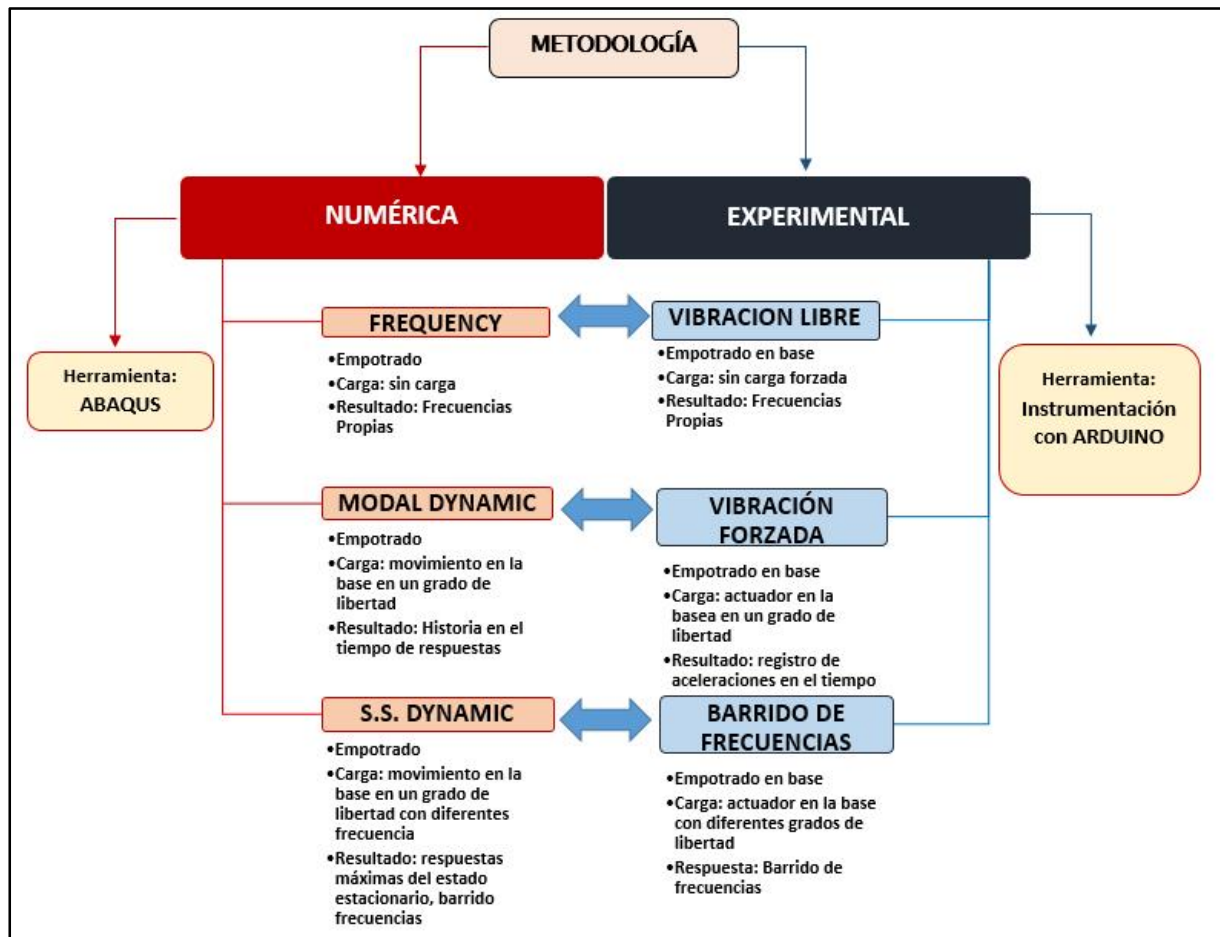


Figura 1.2: ESQUEMA GENERAL DE LOS ANÁLISIS QUE SE PLANTEAN

CAPÍTULO II

ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

2.1 INTRODUCCIÓN

Para el mejor entendimiento del estudio realizado aclara algunos conceptos fundamentales sobre la dinámica estructural y ensayos sobre ello.

En el presente capítulo se detalla algunos conceptos de dinámica estructural, algunas investigaciones de mesas vibratorias (Shake Table), conceptos sobre modelos reducidos y finalmente se explica en que consiste la instrumentación abierta básicamente con respecto a la medición de datos y su aplicación de éste en la dinámica estructural.

2.2 CONCEPTOS DE DINÁMICA ESTRUCTURAL

A las estructuras que están sometidas a cargas que varían con el tiempo, se considera como un sistema dinámico [Villarreal, 2009]

Se dice que una acción tiene un carácter dinámico si varia con el tiempo y da origen a las fuerzas de inercia en las estructuras. Todas las características de las cargas dinámicas (módulo, dirección, sentido, punto de aplicación), o sólo algunas de ellas, varían con el tiempo [Barbat & Canet, 1994]

Ejemplos se algunas fuentes importantes de vibración, capaces de afectar a las estructuras son las que se muestran en la figura 2.1

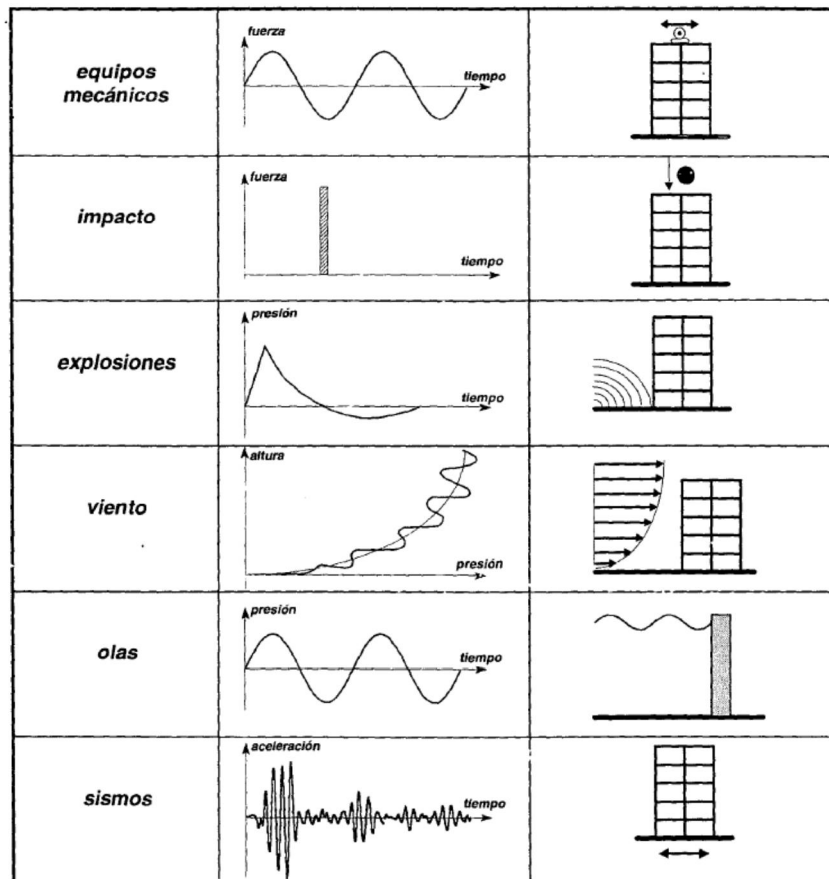


Figura 2.1: TIPOS DE EXCITACIÓN DINÁMICA [García, 1998]

2.2.1 RESPUESTA DINÁMICA

Se define como respuesta dinámica cualquier cantidad que pueda caracterizar el efecto de las cargas dinámicas en una estructura. En la figura 2.2 se ilustra que la respuesta dinámica de una estructura producida por un movimiento del terreno en su base y puede consistir en desplazamientos, velocidades, aceleraciones, tensiones, deformaciones, etc. [Barbat & Canet, 1994]

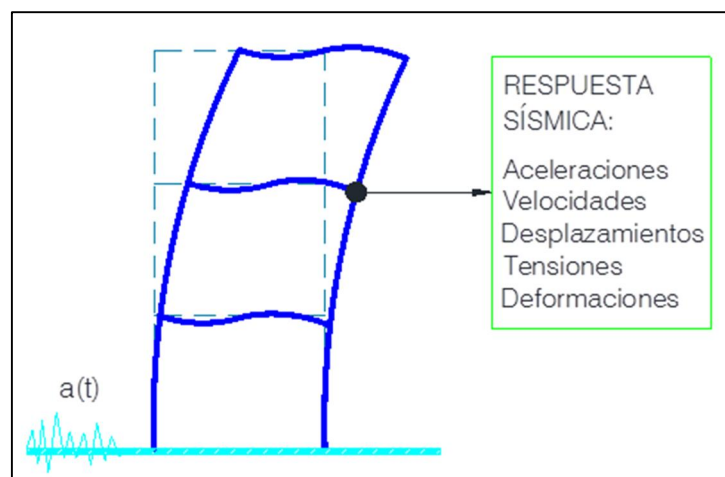


Figura 2.2: DEFINICIÓN DE RESPUESTA SÍSMICA

2.2.2 GRADOS DE LIBERTAD

Se entiende por grados de libertad dinámicos, al número de parámetros desconocidos, que determinan la ubicación de las masas del sistema ante todas las probables deformaciones elásticas de sus elementos. Este número puede ser determinado por la mínima cantidad de conexiones adicionales, que son necesarias ingresarlos al sistema para fijar todas las masas.

2.3 SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

Un sistema de linealidad elástica estructural o mecánica es normalmente definido a través de sus propiedades físicas esenciales de masa del sistema, propiedades elásticas y amortiguamiento.

Los sistemas con un grado de libertad pueden ser representados convenientemente por el modelo matemático que aparece en la fig. 2.3 usualmente idealizado en la literatura [Chopra, 2014], [Clough & Penzien, 1995], [Paz, 1992] para un sistema con 1 GDL, conocido también por oscilador de 1GDL. Este modelo está definido por la masa del cuerpo representada por m , la rigidez del cuerpo representada por k y por el amortiguamiento del cuerpo representado por c , con un desplazamiento $u(t)$ debido a una fuerza exterior $f(t)$. Este tipo de esquema presenta un diagrama de cuerpo libre (fig. 2.3 (b)), que establece el equilibrio de las fuerzas asociadas al modelo.

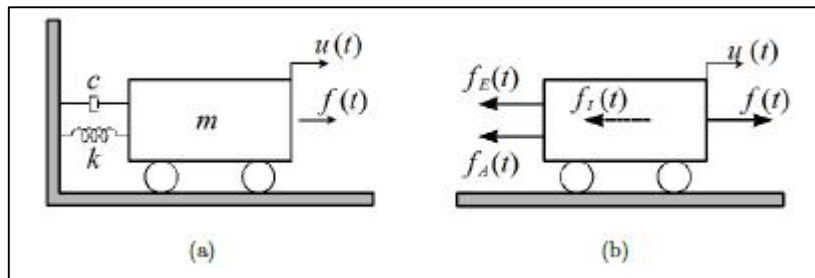


Figura 2.3: SISTEMA DE 1GDL: (a) Modelo Idealizado (b) Diagrama de cuerpo libre

A partir de la figura 2.3 (b) se puede verificar que el equilibrio de las fuerzas actuantes en el sistema está dado por:

$$\underbrace{f_I(t) + f_A(t) + f_E(t)}_{\text{Fuerzas Externas}} = \underbrace{f(t)}_{\text{Fuerzas Externas}} \quad (2.1)$$

Siendo $f_I(t)$ la fuerza de inercia del sistema, $f_A(t)$ fuerza de amortiguamiento del sistema y $f_E(t)$ la fuerza elástica del sistema.

2.3.1 ECUACION DE MOVIMIENTO DE SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD

La formulación de la ecuación de movimiento para un sistema estructural dinámico con 1 GDL puede ser obtenida por varias vías, como se describe en la bibliografía [Chopra, 2014],

[Clough - Penzien, 1995], [Paz, 1992]. Esta ecuación puede ser expresada a través de la segunda ley de Newton, que define una fuerza exterior $f(t)$ aplicada a un cuerpo con masa m igual a la tasa de variación de la cantidad de movimiento:

$$f(t) = \frac{\partial}{\partial t} \left(m \frac{\partial u}{\partial t} \right)$$

El principio de D'Alembert asume que la masa m de un cuerpo sujeta a una aceleración desarrolla una fuerza interna, conocida como la fuerza de inercia $f_I(t)$ que es proporcional y opuesta a la aceleración. Considerando que la masa m del sistema se mantiene constante a lo largo del tiempo se puede escribir:

$$f_I(t) = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \equiv \underbrace{m\ddot{u}(t)}_{\text{Fuerza de Inercia}}$$

Sabiendo que la fuerza de amortiguamiento $f_A(t)$ es proporcional a la velocidad $\dot{u}(t)$ y que la fuerza elástica $f_E(t)$ es proporcional al desplazamiento $u(t)$, la ecuación de equilibrio dinámico (2.1) puede ser definida por:

$$\underbrace{m\ddot{u}(t)}_{\text{Fuerza de Inercia}} + \underbrace{c\dot{u}(t)}_{\text{Fuerza de amortiguamiento}} + \underbrace{ku(t)}_{\text{Fuerza elástica}} = \underbrace{f(t)}_{\text{Fuerza Exterior}} \quad (2.2)$$

Donde m , c y k son constantes a lo largo del tiempo. $f(t)$ Representa las fuerzas externas aplicadas al sistema estructural (variables a lo largo del tiempo) y $\ddot{u}(t)$, $\dot{u}(t)$ y $u(t)$ representan las historias de aceleraciones, de velocidades y desplazamientos a lo largo del tiempo. La ecuación (2.2) corresponde a un sistema de 1 ecuación diferencial lineal de segundo orden con 1 incógnita (los desplazamientos $u(t)$).

2.3.2 VIBRACIÓN LIBRE DE SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

La obtención de la frecuencia natural de vibración de un sistema con 1 GDL es usualmente introducida despreciando el efecto del amortiguamiento del sistema estructural ($c = 0$) y las fuerzas externas aplicadas a la estructura ($f(t) = 0$). De esta forma la ecuación de equilibrio dinámico (2.2) puede ser escrita de la siguiente forma:

$$m\ddot{u}(t) + ku(t) = 0 \quad (2.3)$$

Una vez que no existen fuerzas externas aplicadas, la oscilación del sistema es debida a las condiciones iniciales (desplazamiento y velocidad iniciales), de esta forma la respuesta en desplazamiento $u(t)$ verifica las condiciones iniciales dadas por:

$$u(0) = u_0 \quad y \quad \dot{u}(0) = \dot{u}_0, \text{ para } t=0$$

Como solución general de la ecuación (2.3) podemos considerar una función del tipo sinusoidal, con frecuencia w , definida por:

$$u(t) = a \cos(w t) + b \sin(w t), \quad \text{con } w = \sqrt{\frac{k}{m}} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (2.4)$$

Donde a y b son valores constantes y w es usualmente definida como la frecuencia angular natural, que corresponde a la frecuencia con que un oscilador con masa m y rigidez k tiende a oscilar naturalmente.

Asociados al concepto de frecuencia angular natural están otros dos, la frecuencia natural de vibración f_N , y el periodo natural de vibración T_N , definidos por:

$$f_N = \frac{w}{2\pi} [\text{Hz}] \quad ; \quad T_N = \frac{1}{f_N} [\text{s}]$$

La solución particular de la ecuación (2.3) es definida por:

$$u(t) = u_0 \cos(w t) + \frac{\dot{u}_0}{w} \sin(w t) \quad (2.5)$$

Que representa el desplazamiento que un sistema estructural sufre a lo largo del tiempo, debido a condiciones iniciales no nulas.

Para casos en que se pretende determinar la respuesta estructural para una acción dinámica cualquiera, la ecuación de equilibrio dinámico (de forma de la ecuación (2.2)) puede ser resuelta en el dominio del tiempo, recordando la integral de Duhamel, o a través de la transformada de Fourier para el dominio de la Frecuencia.

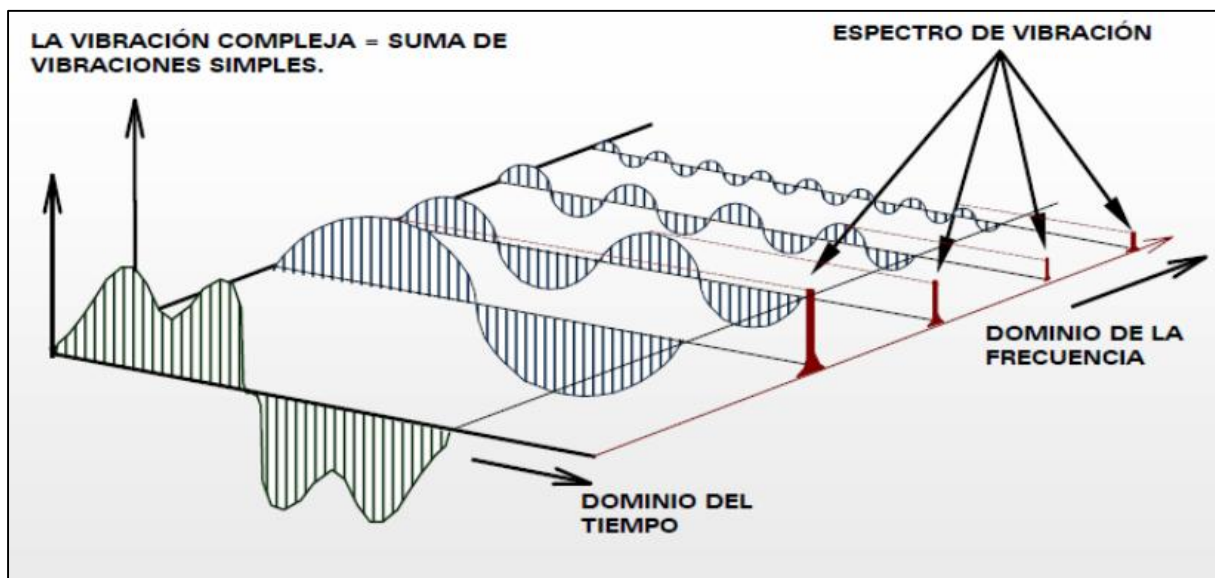


Figura 2.4: SEÑALES EN EL DOMINIO DEL TIEMPO Y EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA (ESPECTRO)
[ESCUDERO, 2011]

Varias experiencias de estudios en el dominio de la frecuencia se realizaron con éxito [Tejada 2011]; [Mendes, 2012]; [Escudero, 2011] utilizando la transformada de Fourier, principalmente para el cálculo de frecuencias naturales experimentalmente.

También se puede utilizar los conceptos de espectros de respuesta en *periodos* para la obtención de las máximas respuestas estructurales, que es el que se utiliza en el presente trabajo.

2.3.3 OSCILACIONES FORZADAS AMORTIGUADAS – ARMÓNICAS EN SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD

La obtención de la respuesta estructural de un sistema con 1 GDL frente a una fuerza armónica se introduce resolviendo la ecuación (2.2).

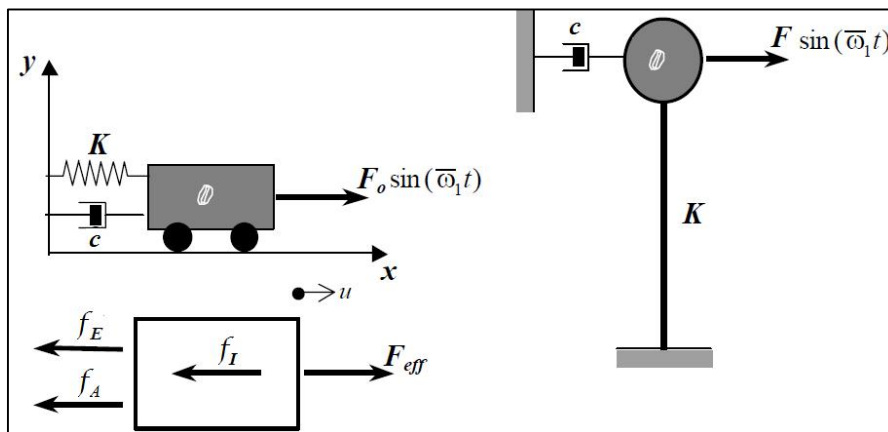


Figura 2.5: SISTEMA DE 1GDL FORZADA AMORTIGUADA - ARMÓNICA [OLLER-CAR, 1999]

La ecuación (2.2) expresada en fuerzas se puede escribir de la siguiente forma:

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = F_0 \sin(\overline{\omega}_1 t) \quad (2.6)$$

Y expresada en aceleraciones:

$$\ddot{u}(t) + 2v w \dot{u}(t) + w^2 u(t) = \frac{F_0}{m} \sin(\overline{w}_1 t) \quad (2.7)$$

La solución para la ecuación diferencial (2.7) está representada por una solución compuesta de la suma de la solución inhomogénea más la solución general homogénea [Oller & Car, 1999]

Sol. Compuesta = Sol. Particular Inhomogénea + Sol. General Homogénea

$$u(t) = u_p(t) + u_g(t)$$

Donde w es la frecuencia natural del oscilador y \overline{w}_1 es la frecuencia de la forzante.

Un ejemplo de la solución compuesta para un sistema de 1 GDL amortiguada frente a una forzante periódica armónica se muestra en la figura 2.5:

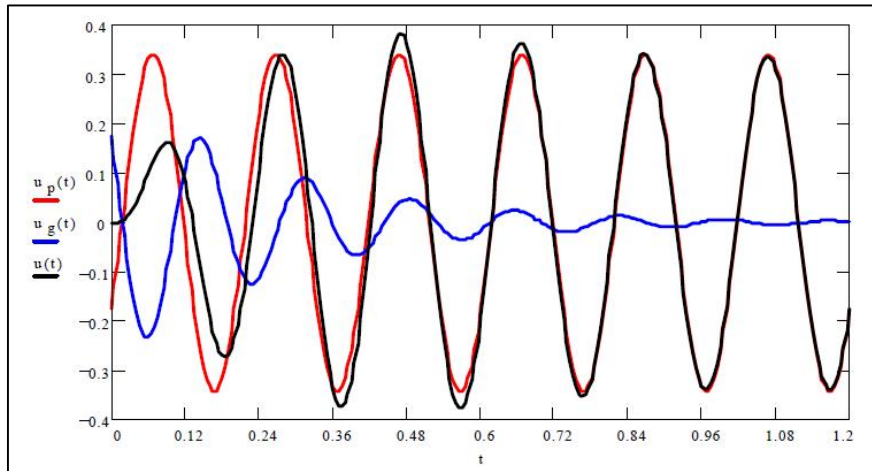


Figura 2.6: RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UN SISTEMA DE 1GDL FORZADA AMORTIGUADA - ARMÓNICA [OLLER & CAR, 1999]

La solución particular inhomogénea es la vibración forzada o la vibración de estado estacionario [Chopra, 2014], que está presente debida a la fuerza aplicada, independientemente de las condiciones iniciales, en la respuesta estructural de la figura 2.5 se presenta en color rojo.

La solución general homogénea es la vibración libre o vibración transitoria [Chopra, 2014], que depende del desplazamiento y la velocidad iniciales, aun estas fueran cero; en la figura 2.5 se observa de color azul, la presencia del amortiguamiento hace que la vibración libre decaiga con el tiempo. Es por tal razón que este componente se denomina vibración transitoria.

2.4 SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

En general, el análisis de la respuesta dinámica de estructuras implica la consideración de varios grados de libertad, no siendo posible la simplificación para solamente 1 GDL.

En este análisis, la determinación de la respuesta dinámica es usualmente realizada adoptando un modelo matemático adecuado, que contemple las propiedades físicas y geométricas de la estructura analizada.

2.4.1 ECUACIONES DE MOVIMIENTO DE UN SISTEMA DE MÚLTIPLES GRADOS DE LIBERTAD

La ecuación que aproxima el comportamiento dinámico de una estructura, discretizada en N grados de libertad, sujeta a una fuerza exterior puede ser definida a través de un sistema de N ecuaciones diferenciales lineales de 2do. Orden a N incógnitas, dado por:

$$\underbrace{\underline{m} \ddot{\vec{u}}(t)}_{\text{Fuerza de Inercia}} + \underbrace{\underline{c} \dot{\vec{u}}(t)}_{\text{Fuerza de amortiguamiento}} + \underbrace{\underline{k} \vec{u}(t)}_{\text{Fuerza elástica}} = \underbrace{\vec{f}(t)}_{\text{Fuerza exterior}} \quad (2.8)$$

Donde \underline{m} , \underline{c} y \underline{k} corresponden respectivamente a las matrices de masa, de amortiguamiento y de rigidez de un modelo estructural, y $\ddot{\vec{u}}$, $\dot{\vec{u}}$ y \vec{u} corresponden respectivamente a los vectores con las historias de aceleraciones, velocidades y desplazamientos y $\vec{f}(t)$ representa el vector de fuerzas exteriores aplicadas a cada grado de libertad.

2.4.2 MATRIZ DE MASA Y AMORTIGUAMIENTO

Para modelos en que la masa se encuentra distribuida por toda la estructura, es necesario considerar la transmisión de fuerzas de inercia. En estos casos, la matriz de masa que se obtiene es una matriz en “banda” con la siguiente forma:

$$\underline{m} = \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix}$$

Los coeficiente de esta matriz pueden ser obtenidos a través del principio de trabajo virtual PTV o por aproximación de elementos finitos MEF. Por ejemplo utilizando MEF, los coeficientes de la matriz de masa m_{ij} son definidos por:

$$m_{ij} = \int_v m N_i N_j dV$$

Donde m representa la masa específica del material (Kg/m^3) y N_i y N_j son funciones de forma.

El modelo con varios grados de libertad más sencillo que se utilizar para describir el comportamiento dinámico de edificios es el correspondiente al pórtico de cortante [Barbat & Canet, 1994]. Para estos modelos la matriz de masa es diagonal, por ejemplo para un modelo con tres grados de libertad:

$$\underline{m} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

No es posible construir la matriz de amortiguamiento a partir de la geometría y de las propiedades de cada elemento, como se hace con la matriz de rigidez [Clough & Penzien, 1995] [Chopra, 2014] [García, 1998] [Paz, 1992]. Entonces la matriz de amortiguamiento \underline{c} puede considerarse del mismo tipo:

$$\underline{c} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix}$$

2.4.3 MATRIZ DE RIGIDEZ

La matriz de rigidez está definida de acuerdo al concepto de “fuerza de restitución elástica que debe actuar en dirección i cuando es aplicado un desplazamiento unitario en dirección j ” caracterizándose así al coeficiente k_{ij} [Méndes, 2012]. En el caso particular del modelo de edificios de cortante, la matriz de rigidez se escribe, en forma explícita de la siguiente forma:

$$\underline{k} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_1 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}$$

Donde k es la rigidez cortante del grupo de pilares del piso i . Su expresión es: $k_i = \frac{12 E I_i}{h_r^3}$, siendo I_i la suma de los momentos de inercia de los pilares situados entre las plantas i y $i-1$ y h_r la altura de tales pilares.

La ecuación (2.8) puede ser resuelta por análisis modal. El método modal es aplicable generalmente al análisis de la respuesta dinámica de estructuras complejas en su intervalo de comportamiento lineal, en particular al análisis de fuerzas y deformaciones en edificios de varios niveles, debido a vibraciones del terreno de mediana intensidad que causan respuestas moderadamente grandes, pero esencialmente al análisis de estructuras que se comporten elásticamente [Rosenblueth, 1992].

2.4.4 ECUACION DE EQUILIBRIO DINAMICO

Luego de definidas las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento, se puede escribir la correspondiente ecuación matricial de equilibrio dinámico para un sistema de 3 grados de libertad.

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \\ \ddot{u}_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1(t) \\ \dot{u}_2(t) \\ \dot{u}_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}$$

Esta ecuación matricial corresponde a un sistema de tres ecuaciones diferenciales de 2do. orden con tres incógnitas, que son los desplazamientos $u_1(t)$, $u_2(t)$ y $u_3(t)$.

2.4.5 VIBRACION LIBRE DE SISTEMAS DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD

Tal como en el análisis del sistema estructural de 1 GDL, la obtención de frecuencias y modos de vibración natural de un sistema estructural de varios grados de libertad se encuentra con base a un análisis de movimiento estructural en régimen libre, asumiendo que no existen fuerzas exteriores aplicadas a la estructura, y no considerando el efecto del amortiguamiento del material de la estructura.

Así, particularizando para un edificio de tres niveles, se obtiene un sistema de tres ecuaciones diferenciales lineales de 2do. orden con tres incógnitas, con la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \\ \ddot{u}_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

La solución para esta ecuación corresponde al problema matemático conocido como problema característico [Paz, 1992] o de valores y vectores propios [Chopra 2014].

Particularizando como ejemplo para uno de los edificios analizados en el presente trabajo, los valores están organizados en matriz de valores propios \underline{w}^2 (en radianes²) y los vectores propios en la matriz modal $\underline{\phi}$:

$$\underline{w}^2 = \begin{bmatrix} 587,6 & 0 & 0 \\ 0 & 4613 & 0 \\ 0 & 0 & 9632,7 \end{bmatrix} (\text{rad}) \quad \text{y} \quad \underline{\phi} = \begin{bmatrix} -34,57 & 77,68 & -62,3 \\ -62,3 & 34,57 & 77,68 \\ -77,68 & -62,3 & -34,57 \end{bmatrix} (\text{mm})$$

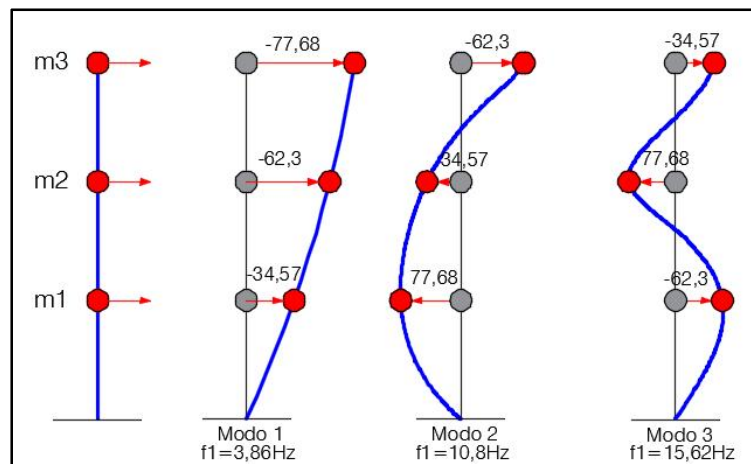


Figura 2.7: MODOS DE VIBRACIÓN NATURALES DE UNA ESTRUCTURA PLANA DE 3 GRADOS DE LIBERTAD DINÁMICOS

2.5 ENSAYOS EXPERIMENTALES EN ANÁLISIS DE DINÁMICA DE ESTRUCTURAS

Los ensayos experimentales dinámicos pueden ser considerados fundamentales para caracterizar el comportamiento dinámico de las estructuras de ingeniería civil. La experimentación permite verificar determinadas situaciones de las estructuras y también permite la comparación de dos soluciones [Oller & Car, 1999] obtenidas mediante:

- Cálculo analítico de las propiedades dinámicas de las estructuras considerando las condiciones iniciales que se han tenido en cuenta en su diseño.
- Determinación experimental, a través de ensayos no destructivos, de las mismas propiedades que se encontraron en el cálculo analítico.

Para el caso de sistemas de varios grados de libertad específicamente para el análisis experimental de un pórtico de cortante se puede caracterizar la instrumentación de actuación de carga y los instrumentos de medición de respuesta estructural.

2.5.1 CONCEPTOS GENERALES - SHAKE TABLES

De todas las fuentes importantes de vibración que afectan a las edificaciones, es el sismo el que ocasiona mayores daños estructurales, llegando incluso al colapso de las mismas.

Los métodos más conocidos para investigar el comportamiento de una estructura ante un sismo son: Experiencias reales de sismo, Pruebas in situ, Pruebas Estáticas (análisis pushover), Pruebas con Mesas Vibratorias, Pruebas pseudo dinámicas, y Pruebas de Carga Centrífuga. De estas pruebas las pruebas con Mesas Vibratorias ofrecen mejores resultados sobre el comportamiento de las estructuras bajo cargas sísmicas, siempre y cuando las condiciones de contorno dinámicas son simuladas correctamente.

Las mesas vibratorias suelen consistir en tablas rectangulares que producen un máximo de seis grados de libertad [Baran et al., 2011]

Las mesas son clasificadas según su tamaño como:

- Pequeñas (dimensiones menores a 3x3m)
- Medianas (dimensiones entre 3x3 a 9x9m) y
- Largas (dimensiones mayores a 9x9m). Las Mesas Vibratorias Largas, permiten representar el comportamiento de estructuras a escala completa, e involucra una costosa construcción y operación.

Y según el actuador como:

- Accionador hidráulico.
- Vibrador electro-dinámico. La principal ventaja del vibrador electro-dinámico es su bajo costo y fácil manejo para objetivos educativos, en comparación con el sistema hidráulico.

Para representar completamente un sismo real, las mesas vibratorias deberían tener la capacidad de moverse en 3 direcciones de referencia, y por lo cual deberían tener componentes que resultan ser muy costosos económicamente, además de conocimientos especiales y experiencia en para su construcción y operación. Ante ello, las mesas vibratorias de tamaños menores y unidireccionales son más convenientes para el análisis de modelos a menor escala, sobre todo si se trata de objetivos netamente educativos.

Un ejemplo que se puede citar es la mesa vibratoria CUSHAKE, que es una mesa vibratoria unidireccional construida en el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Cukurova en Adana-Turquía. CUSHAKE, fue construida con tecnología avanzada en electrónica y computación.

En la figura 2.8 se muestran sus características principales:

SPECIFICATION	VALUE	UNIT
Table dimensions (B × L)	150 × 200	cm
Displacement	±7.5	cm
Velocity (bounded by software)	±40	cm/s
Maximum acceleration	1 g	(g = 9.81 m/s ²)
Table frequency	0–25	Hz
Maximum motor force	50	kN
Motor current	45	kW
Mass of the table	1500	kg
Max. payload (theoretical)	3500	kg

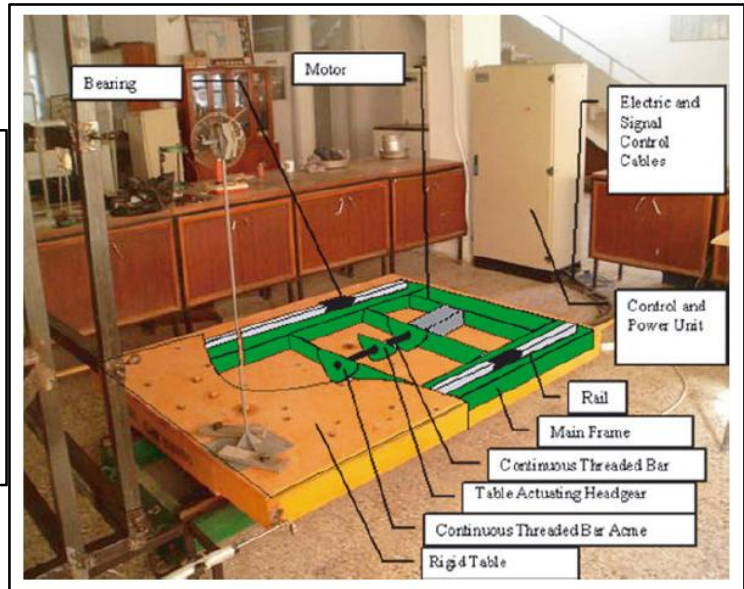


Figura 2.8: MESA VIBRATORIA CUSHAKE-UNIDIRECCIONAL [Baran et al., 2011]

2.5.2 CONCEPTOS GENERALES – MODELOS REDUCIDOS

El objetivo de un ensayo con un modelo reducido generalmente es para:

- Para compararlo con un modelo de elementos finitos para la validación del modelo o de actualización.
- Para verificar un modelo de planta para un sistema de control.
- El desarrollo de un modelo basado experimentalmente para entender las respuestas dinámicas estructurales.

El propósito de la prueba modal también debe proporcionar los requisitos que impulsarán el rigor de las pruebas, el análisis y la cantidad de instrumentación.

Las herramientas más populares para la excitación de estructuras en pruebas modales son agitadores y martillos de impacto.

El modelo de dinámica estructural puede ser un modelo con las cantidades deseadas de frecuencias naturales, relaciones de amortiguamiento viscoso, y formas de los modos con masas modales, o puede ser las funciones de respuesta de frecuencia, o sus transformadas, que pueden ser construidas a partir de la modelo modal. En cualquier caso, la fidelidad del modelo lineal dependerá en gran medida de la validez de los datos experimentales, que generalmente se recogen en forma de respuesta de frecuencia. Con el objetivo de obtener una " estimación lineal adecuada " para un modelo del sistema dinámico estructural bajo prueba, se deben superar varios desafíos en la configuración de la excitación y la toma de datos de respuesta, desafíos que se mencionan [Mayes et al., 2006]:

- Reducir al mínimo las no linealidades en el sistema excitado durante la prueba.

- Obtención de buena relación señal-ruido en el sensor de fuerza
- Obtención de buenas estimaciones de las frecuencias naturales
- La obtención de buenas estimaciones de la amortiguación, la masa modal y formas modales.
- Limitaciones en el tiempo de prueba.

La mayoría de las estructuras del mundo real son, al menos, ligeramente no lineales, pero a menudo una representación lineal de estas estructuras es suficiente para el desarrollo de productos. Los algoritmos de análisis modales experimentales se basan en suposiciones lineales de dinámica estructural y por lo tanto son más eficaces cuando el análisis de datos experimentales que se adapte a las formas modelo lineal.

Algunas experiencias en investigación y comparación numérica y experimental de modelos reducidos se pueden mencionar [Mendes, 2012] presenta un modelo a escala reducida de un edificio; [Uribe, 2012] presenta un modelo a escala reducida de un puente metálico; entre otros.

2.5.3 ARDUINO APLICADO A DINÁMICA ESTRUCTURAL

Los instrumentos destinados a la medición de la respuesta estructural frente a un sismo de modelos reducidos en su mayoría están acoplados con la mesa vibratoria y calibrada con esta. Muchos de estos instrumentos digitales tienen costos altos disminuyendo su utilización principalmente en fines educativos.

La plataforma de Hardware libre Arduino es planteada en este trabajo para la medición de respuestas en aceleraciones del modelo ensayado.

Arduino es una plataforma de hardware de código abierto, basada en una sencilla placa con entradas y salidas, analógicas y digitales, en un entorno de desarrollo que está basado en el lenguaje de programación Processing. Es un dispositivo que conecta el mundo físico con el mundo virtual, o el mundo analógico con el digital [W5].

Las ventajas que ofrece la utilización del microcontrolador y plataforma Arduino son:

- Accesible, las placas Arduino son relativamente baratas en comparación con otras plataformas de microcontroladores. La versión menos costosa del módulo Arduino puede ser montado a mano.
- Multiplataforma, el software de Arduino (IDE) se ejecuta en los sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y Linux
- Programación clara, el software de Arduino (IDE) es fácil de usar para los principiantes, pero lo suficientemente flexible para que los usuarios avanzados lo puedan aprovechar.

- Por su bajo costo y facilidad de uso es un instrumento fácil de adecuarse en los laboratorios de universidad.
- Existe amplia información en Internet.

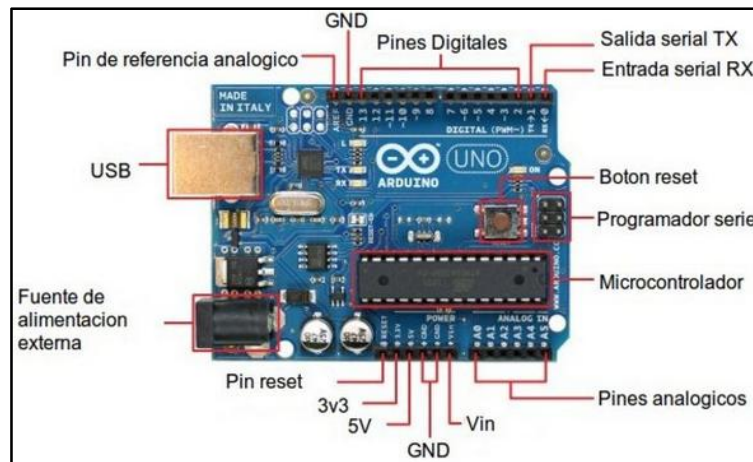


Figura 2.9: PLATAFORMA ARDUINO UNO [Arduino LLC, 2013]

Como antecedente de uso con acelerómetros se tiene:

- Acelerómetros en Inclínómetro digital de vehículos.
- Acelerómetros en la fabricación de giroscopios.
- En Smartphones. Son los responsables de que la pantalla cambie su orientación según posicionamos el móvil.

Y para medición de aceleraciones de estructuras en términos educaciones aún no se encuentra antecedentes.

La razón por la que se mide la aceleración en lugar de la velocidad y el desplazamiento es porque la aceleración proporciona las fuerzas directamente, por lo que se pueden utilizar para establecer las fuerzas que experimenta una estructura durante un terremoto o sismo. Además, los sensores de aceleración son generalmente más robustos que los sensores sísmicos. Y, por lo general son pequeños de modo que son fáciles de colocar en lugares clave en una estructura. El registro de aceleración puede entonces ser procesada por computadora y se integra para obtener la velocidad y registros de desplazamiento.

CAPÍTULO III

ESTUDIO DEL MODELO NUMÉRICO

3 ESTUDIO DEL MODELO NUMÉRICO

3.1 INTRODUCCION

Con el objetivo de analizar el comportamiento del edificio a escala reducida y colocar las condiciones iniciales y probables de su comportamiento se realizó previamente el análisis numérico con el método de elementos finitos MEF.

El método de elementos finitos, es un método numérico, el cual consiste en dividir la estructura de una serie de elementos, describiendo el comportamiento del elemento por medio de ecuaciones constitutivas elementales. Estos elementos se interconectan en nodos donde al aplicar el principio de equilibrio se obtiene un conjunto de ecuaciones simultaneas.

El análisis numérico se desarrolló utilizando el software en elementos finitos Abaqus CAE V6.14 para la definición de geometría o pre proceso, análisis y vista de resultados o pos proceso.

En el presente capítulo se expone el detalle de la geometría de los modelos planteados en los cuales se presenta tres análisis dinámicos elástico lineales realizados; el primer análisis es el procedimiento denominado Frequency para obtener las frecuencias propias; el segundo análisis es el procedimiento Modal Dynamic para la obtención de respuestas dinámicas en historias de tiempo para aceleraciones, velocidades y desplazamientos; el tercer análisis es el procedimiento Steady State Dynamic donde se obtiene las máximas amplitudes del estado estacionario para diferentes frecuencias, es decir, un barrido de frecuencias.

3.2 ANALISIS DIMENSIONAL

En principio, la estructura ensayada (modelo) no tiene por qué tener las mismas dimensiones, ni la misma forma, ni las mismas cargas, ni tampoco debe ser del mismo material que la estructura real (prototipo) [Blanco & Oller, n.d.]

Utilizando la teoría general del análisis dimensional, se definen las magnitudes físicas que intervienen en el modelo y el prototipo en función de las magnitudes fundamentales.

La matriz de estas magnitudes se muestra en la tabla 3.1:

Tabla 3.1: MATRIZ DE MAGNITUDES

	l	m	K	w	a	d
L	1	-1	-1	0	1	1
F	0	1	1	0	0	0
T	0	2	0	-1	-2	0

Las magnitudes físicas que intervienen en el modelo son los explicados en la figura 3.1

Donde:

- l = altura entre los pisos
- m = masa de cada piso
- k = rigidez de cada piso
- w = frecuencia propia de cada piso
- a = aceleración aplicada en la base
- u = desplazamiento provocado por la aceleración en la base

El número de magnitudes fundamentales es tres y el número de magnitudes físicas que intervienen en el problema es seis, por tanto, el número de monomios independientes es igual a tres.

Las ecuaciones formadas a partir de la matriz de magnitudes son las que se presentan a continuación:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon l - \varepsilon m - \varepsilon k + \varepsilon a + \varepsilon u &= 0 \\
 \varepsilon m + \varepsilon k &= 0 \\
 2\varepsilon m - \varepsilon w - 2\varepsilon a &= 0
 \end{aligned}$$

Aplicando el teorema de Buckingham, el problema físico que se estudia puede representarse también como una función de sus productos adimensionales. Por lo tanto los grupos adimensionales del problema son definidos por:

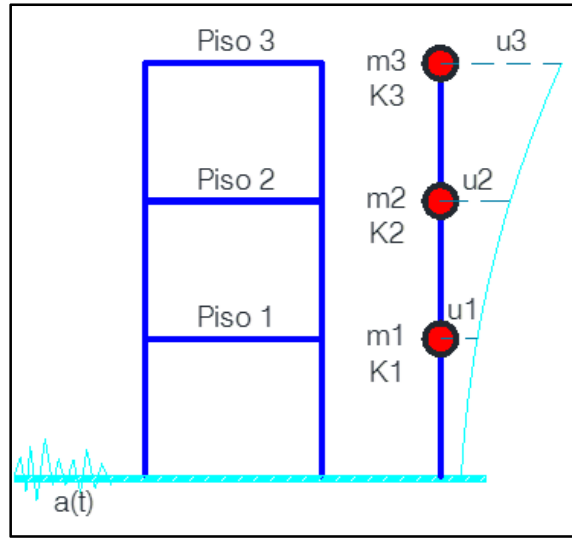


Figura 3.1: ESQUEMA DEL EDIFICIO Y MAGNITUDES FISICAS

Los grupos adimensionales formados son:

$$\pi_1 = \frac{m * w^2}{K} \quad \pi_2 = \frac{l}{u} \quad \pi_3 = \frac{a}{w^2 * u}$$

De acuerdo a los grupos adimensionales se obtiene la escala para cada magnitud física:

$$\pi_1 = \pi'_1 = \frac{m * w^2}{K} = \frac{m' * w'^2}{K'} \quad \Rightarrow \quad \frac{m'}{m} = \frac{w'^2 * K'}{w^2 * K}$$

$$\pi_2 = \pi'_2 \quad \frac{l}{d} = \frac{l'}{d'} \quad \Rightarrow \quad \frac{l}{l'} = \frac{u}{u'}$$

$$\pi_3 = \pi'_3 \quad \frac{a}{w^2 * u} = \frac{a'}{w'^2 * u'} \quad \Rightarrow \quad \frac{a'}{a} = \frac{w'^2 * u'}{w^2 * u}$$

Los factores de escala de las magnitudes que intervienen en el problema pueden expresarse como:

$$\gamma_l = \frac{l'}{l} \quad \gamma_l = \frac{m'}{m} \quad \gamma_w = \frac{w'}{w} \quad \gamma_E = \frac{K'}{K} \quad \gamma_a = \frac{a'}{a} \quad \gamma_d = \frac{d'}{d}$$

De la condición de igualdad de los grupos adimensionales en el modelo y el prototipo se obtiene:

$$\gamma_m = \frac{\gamma_K}{\gamma_w^2}$$

$$\gamma_w^2 = \frac{\gamma_K}{\gamma_m}$$

$$\gamma_a = \gamma_w^2 * \gamma_d$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_a}{\gamma_w^2}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_a * \gamma_m}{\gamma_K}$$

Las comprobaciones y equivalencias se realizan en el capítulo de resultados, con el modelo experimental desarrollado.

La escala para empezar el modelo se tomó en la unidad de longitud de la distancia entre forjados con una escala de $\gamma_l = \frac{l'}{l} = \frac{1}{30}$.

3.3 DEFINICIÓN DE UNIDADES

Abaqus no tiene una definición de unidades establecidas previamente, Para empezar la modelización numérica se requiere hacer un convenio de unidades a utilizar. En la tabla 3.2 se muestra las unidades que son consistentes en Abaqus Cae.

Tabla 3.2: UNIDADES CONSISTENTES-ABAQUS [Abaqus, n.d.]

Cantidad	SI	SI (mm)	US Unid (ft)	US Unit (inch)
Longitud	m	mm	ft	in
Fuerza	N	N	lbf	lbf
Masa	kg	Ton (10 ³ kg)	slug	lbf s ² /in
Tiempo	s	s	s	s
Esfuerzo	Pa (N/m ²)	MPa (N/mm ²)	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Energía	J	mJ (10 ⁻³ J)	ft lbf	in lbf
Densidad	Kg/m ³	Ton/mm ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

De la tabla 3.2, las unidades escogidas para el modelo numérico son las correspondientes al sistema internacional de unidades en milímetros SI (mm).

La definición de la geometría, los elementos a utilizar, condiciones de contorno y los análisis estudiados se detallan a continuación.

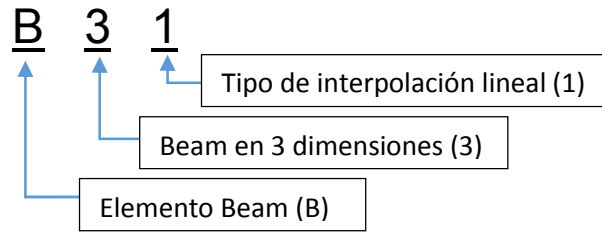
3.4 CARACTERIZACIÓN DEL MODELO - PREPROCESO

3.4.1 ELEMENTOS

Considerando que la geometría es simétrica y sencilla se opta por utilizar elementos tipo Wire-Beam para los pilares y elementos tipo “Shell” para los forjados.

3.4.1.1 Elemento Wire-Beam:

Los elementos usados para los pilares se definió en Abaqus como elemento tipo “Beam” que está considerado dentro del grupo de elementos estructurales y la denominación utilizada en este proyecto es:



La nomenclatura indica lo siguiente:

- La letra B: se refiere al elemento estructural Beam
- El primer número 3: se refiere al espacio dimensional del elemento en este caso en tres dimensiones, por tanto los grados de libertad activos son 6 en cada nodo.
- El número 1: indica el tipo de interpolación usada para los nodos del elemento en este caso es lineal (1) si fuera cuadrática (2).

Los elementos utilizados son del tipo vigas de Timoshenko [Oñate, 1995] [Zienkiewicz, 2005], que considera la deformación por cortante transversal a pesar que la sección transversal es pequeña con relación a la altura de cada pilar (menor a 1/15 de la distancia entre forjados); la interpolación lineal es adecuada para este tipo de análisis con estas condiciones mencionando también que el material usado es homogéneo.

Abaqus asume la deformación por cortante transversal de las vigas de Timoshenko es del tipo lineal elástico y con módulo fijo, por lo tanto independiente de la respuesta de la sección de la viga a la deformación axial y a flexión.

3.4.1.2 Orientación del Elemento tipo Beam

La orientación de los pilares se definieron según los ejes locales que son del tipo (t, n_1, n_2) y que por defecto toman el valor de $(0, 0, -1)$; para definir la orientación que se muestra en la figura 3.2 donde el eje "t" es la tangente al plano del eje neutro en dirección del nodo uno al nodo dos.

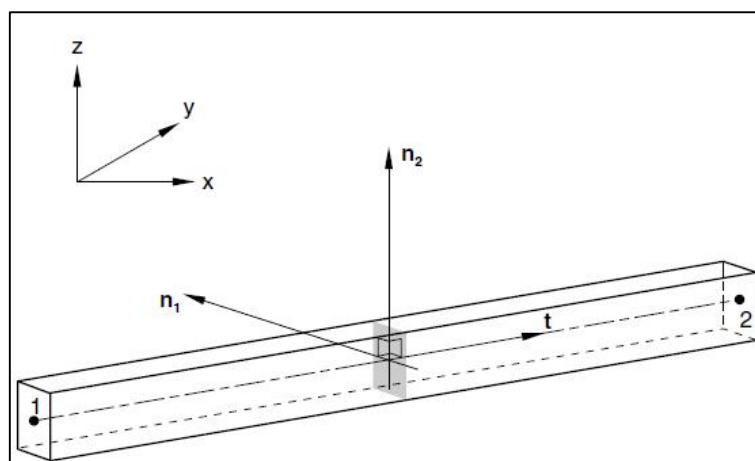


Figura 3.2: DEFINICION DE EJES LOCALES PARA ELEMENTO BEAM

Para la modelización se definió como ejes locales los siguientes valores (1, 0, 0) y en la figura 3.3 se muestra dicha definición.

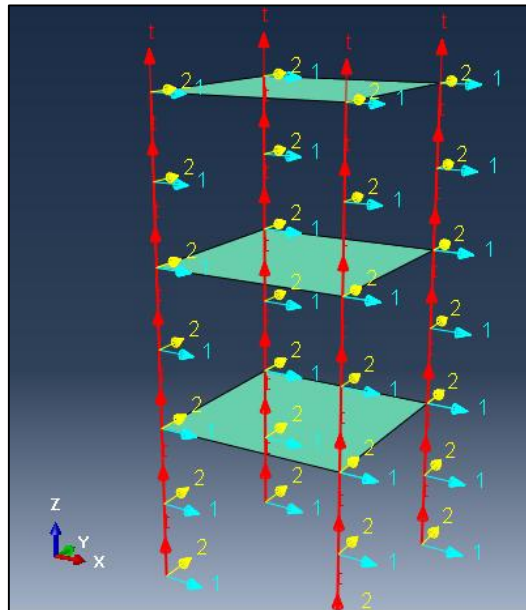


Figura 3.3: DEFINICION DE EJES LOCALES PARA MODELO A ESCALA REDUCIDA

Las propiedades geométricas y mecánicas para el elemento “beam” o tipo viga de los pilares son los siguientes:

Tabla 3.3: PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DE PILARES H=10cm

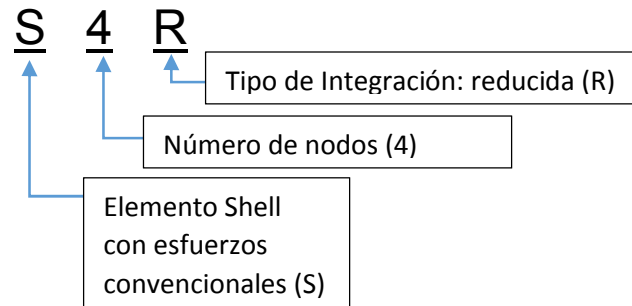
Modelo H=10cm		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Altura entre forjados	100	mm
Material	Poliamida	
Módulo de Young	1400	N/mm ²
Densidad	1.14E-09	Tn/mm ³
M. de Poisson	0.45	
Rigidez por piso	2.67E-01	N/mm

Tabla 3.4: PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DE PILARES H=18cm

Modelo H=18cm		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Altura entre forjados	180	mm
Material	acero	
Módulo de Young	210000	N/mm ²
Densidad	7.85E-09	Tn/mm ³
M. de Poisson	0.3	
Rigidez por Piso	6.87E+00	N/mm

3.4.1.3 Elemento Shell:

Los elementos usados para los forjados se definió en Abaqus como elemento tipo “Shell” que también está considerado dentro del grupo de elementos estructurales y la denominación que se utiliza es:



La nomenclatura indica lo siguiente:

- La letra S: se refiere que el elemento utilizado es tipo Shell con esfuerzos convencionales a la teoría de este tipo de elementos.
- El número 4: indica el número de nodos del elemento Shell.
- La letra R: indica el tipo de integración, es opcional y en este caso se utiliza la letra R que indica integración reducida para aliviar los efectos de bloqueo de los elementos placa de Reissner-Mindlin.

Por tanto se utiliza placa delgada de Reissner-Mindlin [Oñate, 1995]; [Zienkiewicz, 2005] que asume los efectos de deformación por cortante al igual que los elementos Beam como vigas de Timoshenko.

Respecto al espesor se utiliza elementos de placa delgada (Thin) ya que el espesor de la placa es 5mm, menor a 1/15 de la longitud de la placa (120mm).

Las propiedades geométricas y mecánicas para el elemento Shell de los forjados son los siguientes:

Tabla 3.5: PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DE FORJADOS H=10cm

Modelo H=10cm		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Dimensiones de placa	120x120x5	mm
Material	Metacrilato	
Módulo de Young	3300	N/mm ²
Densidad	1.19E-09	Tn/mm ³
M. de Poisson	0.45	

Tabla 3.6: PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DE FORJADOS H=18cm

Modelo H=18cm		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Dimensiones de Placa	120x120x10	mm
Material	Metacrilato	
Módulo de Young	3300	N/mm ²
Densidad	1.19E-09	Tn/mm ³
M. de Poisson	0.45	

3.4.2 PARTICULARIDADES DEL MODELO

La utilización de los elementos Beam y Shell fueron elegidos en esta modelización por tener congruencia en los grados de libertad por nodo: 6 en cada caso por tanto coinciden.

También los nodos contenidos en el eje neutro de ambos elementos son coincidentes.

Siendo tales las similitudes se utiliza ambos elementos para la modelización numérica estructural y se le asignan las propiedades físicas requeridas para la realización de los análisis dinámicos para un comportamiento elástico lineal.

Se desarrollaron análisis dinámicos en los modos de vibración longitudinales mas no en torsión, es por esta razón que se puede simplificar el modelo para que su resolución emplee menor tiempo computacional.

Esta simplificación consiste en considerar a los forjados infinitamente rígidos con respecto a los pilares, así solo se considera la masa de los forjados y no los modos de vibración propios de los mismos. Para este fin se ha utilizado la función “create constraint” del módulo “interacción”, del tipo “rigid body” [Abaqus, n.d.].

La geometría del modelo a escala se muestra en la figura 3.4:

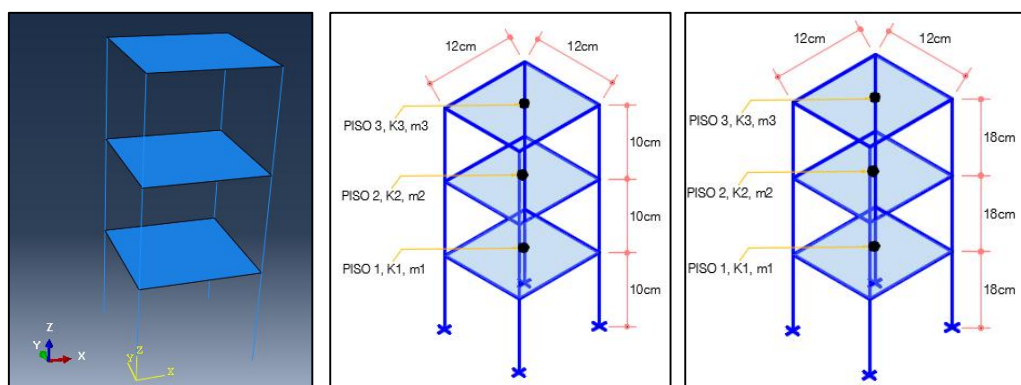


Figura 3.4: GEOMETRIA DEL MODELO A ESCALA REDUCIDA

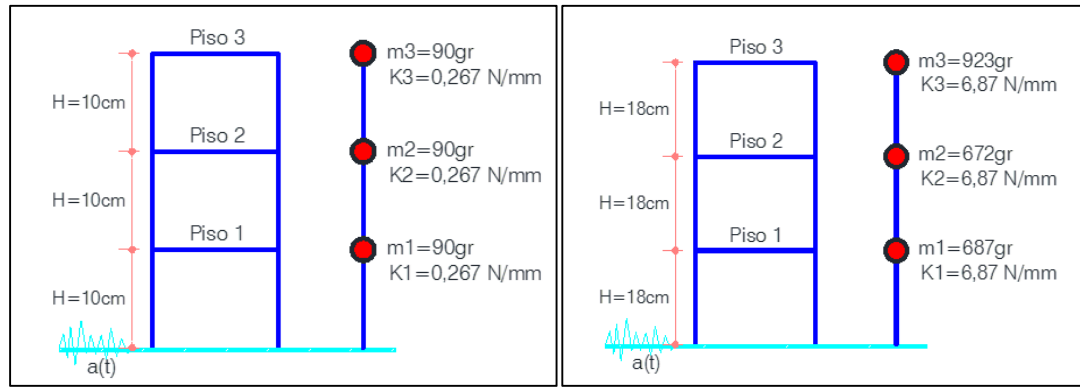


Figura 3.5: DEFINICIÓN DE PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS PARA LOS EDIFICIOS DE H=10cm Y H=18cm

3.4.3 CONDICIONES DE CONTORNO

Se impusieron las condiciones de contorno en la base que es base fija empotrada, es decir, se restringieron todos los grados de libertad en la base del edificio. Esta condición es usada para todos los análisis.

En el caso del primer análisis de Frequency no se coloca ningún tipo de carga; para los siguientes dos análisis si se coloca carga dinámica de movimiento en la base.

3.5 ANALISIS DINÁMICO

Se ha realizado tres análisis dinámicos en el rango elástico lineal, mediante el módulo “Lineal Perturbation” que es utilizado justamente para analizar solo problemas lineales; las condiciones de contorno son las impuestas en la geometría del modelo.

El primer análisis consiste en el cálculo de las frecuencias naturales que corresponden a los modos longitudinales; el segundo análisis corresponde a la respuesta de la estructura en el dominio del tiempo frente a una carga aplicada; y el tercer análisis consiste en la máxima respuesta de la estructura en su estado estacionario frente a diferentes frecuencias de la misma.

El método de solución que utiliza Abaqus es el de la rigidez para la resolución de problemas lineales es decir que ensambla una matriz de rigidez con las propiedades asignadas en la geometría del modelo a analizar; así para los análisis dinámicos realizados se seleccionó el método de *análisis modal*, por generar menor tiempo computacional en su proceso.

3.5.1 ANALISIS FREQUENCY MODAL ANALYSIS

El presente análisis consiste en hallar las frecuencias naturales del sistema, inicia en el módulo “Linear Perturbation” seguida por el procedimiento “Frequency”.

Las simplificaciones impuestas previamente relacionadas con la concentración de la masa y la existencia de un diafragma rígido en los forjados hacen que la estructura pueda entenderse como un conjunto de cuerpos rígidos en el plano horizontal, vinculados entre sí por elementos flexibles, obteniéndose de este modo el denominado pórtico de cortante [Chopra, 2014].

El edificio modelado posee un número de grados de libertad dinámicos igual a tres veces el número de diafragmas rígidos, es decir un número de grados de libertad dinámicos igual a nueve.

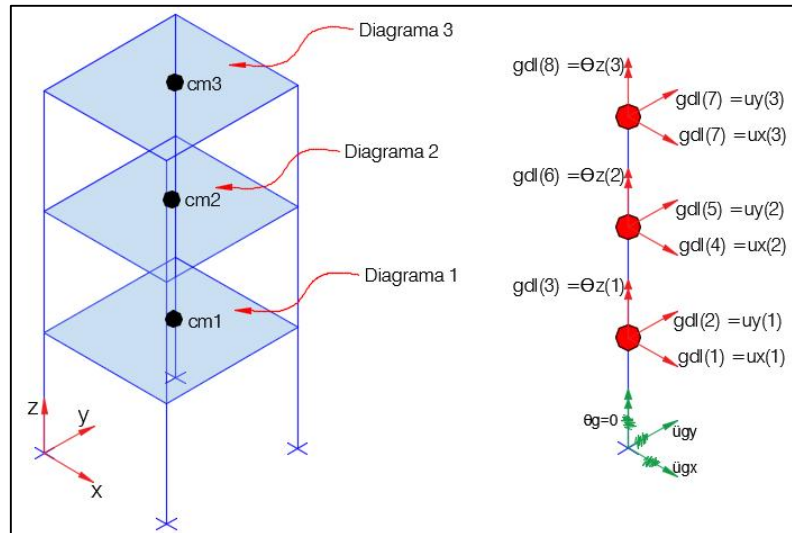


Figura 3.6: IDEALIZACIÓN, GRADOS DE LIBERTAD Y COMPONENTES DE ACELERACIÓN DE LA BASE CONSIDERADAS EN EL ANÁLISIS DINÁMICO DE UN PÓRTICO ESPACIAL [Noy, 2013].

3.5.1.1 Procedimiento

Se analizaron las 6 primeras frecuencias naturales del modo longitudinal y por tratarse de un edificio simétrico en los ejes x e y las frecuencias naturales son iguales, obteniéndose las 3 primeras frecuencias en un modelo simplificado de pórtico plano.

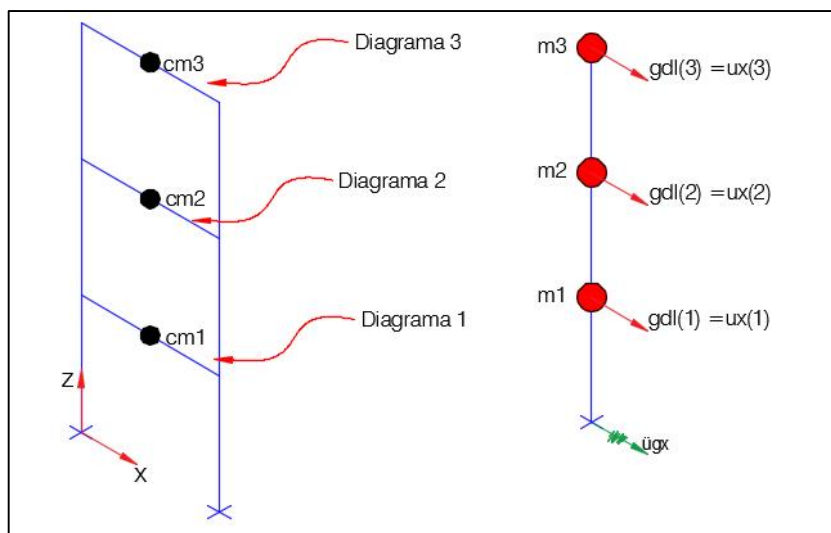


Figura 3.7: IDEALIZACIÓN, GRADOS DE LIBERTAD Y COMPONENTES DE ACELERACIÓN DE LA BASE CONSIDERADAS EN EL ANÁLISIS DINÁMICO DE UN PÓRTICO PLANO [Noy, 2013].

Para la obtención de frecuencia en este procedimiento lineal, Abaqus utiliza el método análisis modal, así su procedimiento se puede comparar con un análisis de un pórtico de cortante plano.

Se realizó un análisis preliminar utilizando la simplificación de pórtico plano por el método de valores y vectores propios, y luego el análisis del pórtico realizado con Abaqus con las restricciones impuestas y sin ninguna carga aplicada para las primeras 10 frecuencias propias; se escogieron de estas frecuencias las correspondientes a los grados de libertad dinámicos de los modos longitudinales descartándose las frecuencias correspondientes a la rotación del diafragma rígido.

Figura 3.8: DEFINICIÓN DE LA CANTIDAD DE FRECUENCIAS PROPIAS SOLICITADAS A ABAQUS

3.5.1.2 Obtención de resultados - Pos proceso

Los resultados para ambos modelos se muestran en las tablas 3.7 y 3.8 respectivamente:

Tabla 3.7: FRECUENCIAS NATURALES DEL SISTEMA-H=10cm

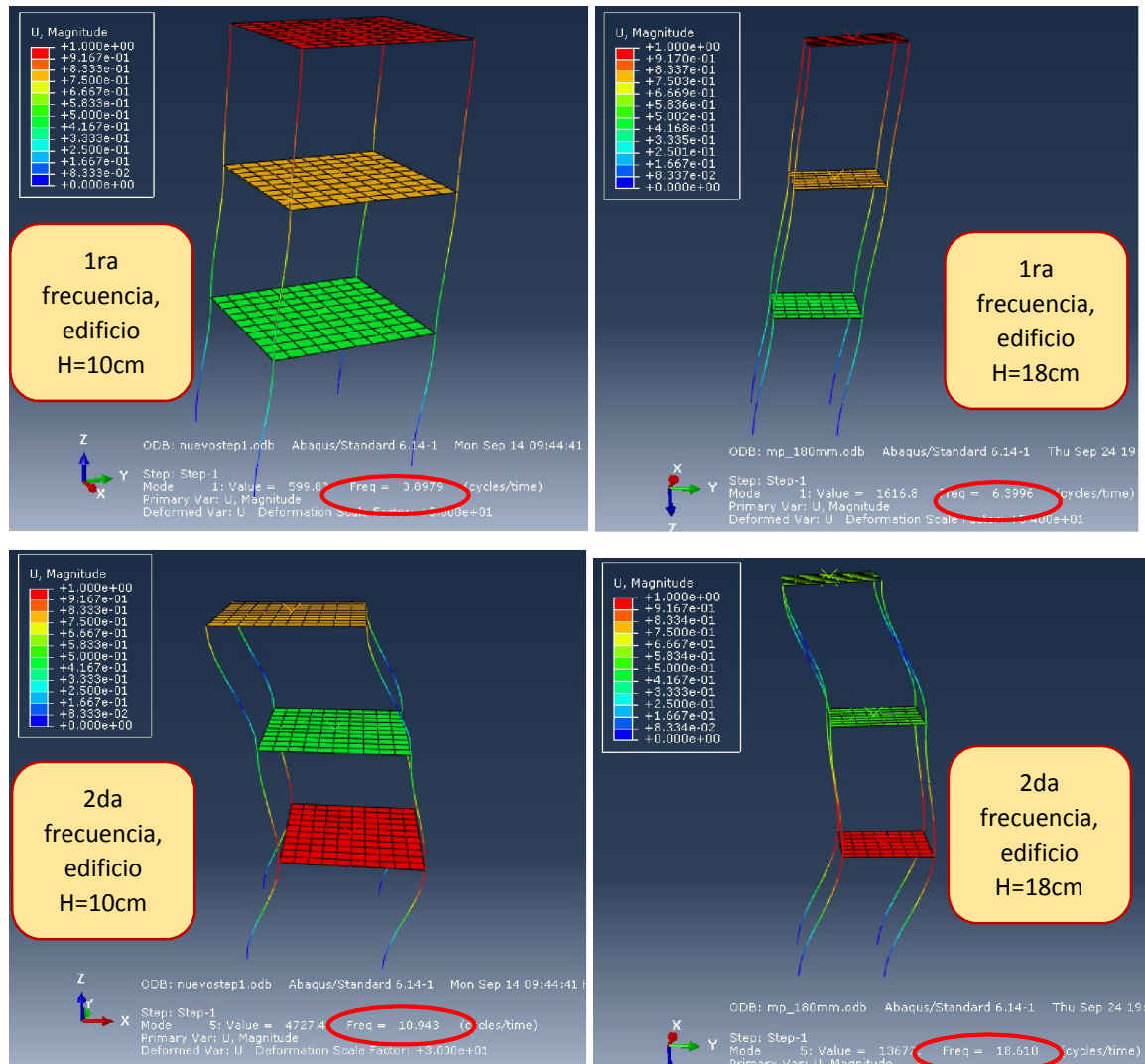
FRECUENCIAS	PORTICO PLANO H=10cm	PORTICO 3D ABAQUS H=10cm	%
Primera frecuencia	3.85 Hz	3.898 Hz	98.77
Segunda frecuencia	10.81 Hz	10.943 Hz	98.78
Tercera frecuencia	15.62 Hz	15.862 Hz	98.47

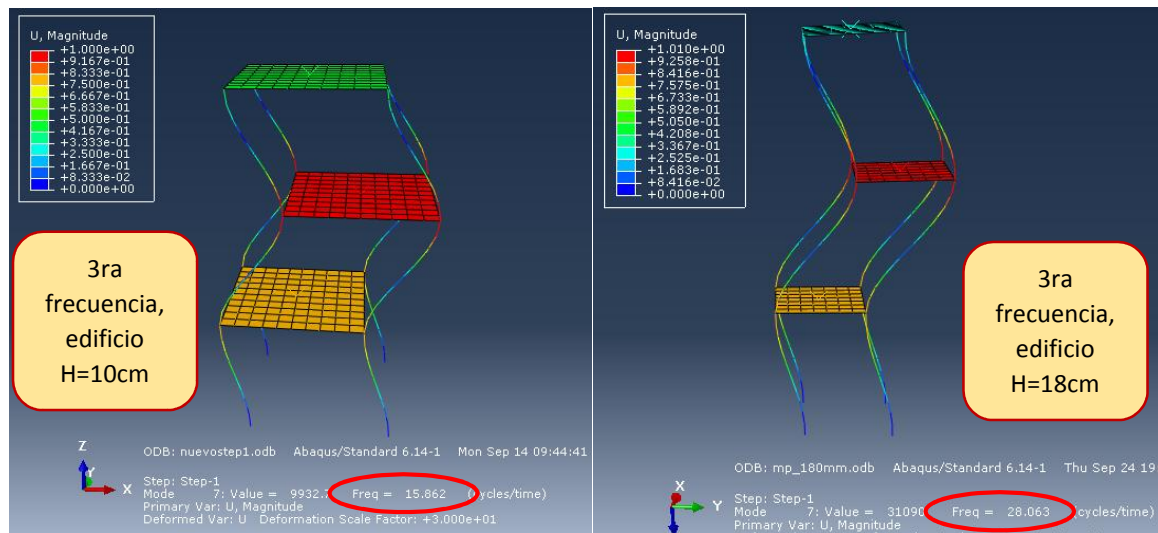
Tabla 3.8: FRECUENCIAS NATURALES DEL SISTEMA-H=18cm

FRECUENCIAS	PORTICO PLANO H=18cm	PORTICO 3D ABAQUS H=18cm	%
Primera frecuencia	6.51 Hz	6.39 Hz	98.09
Segunda frecuencia	18.95 Hz	18.61 Hz	98.20
Tercera frecuencia	28.49 Hz	28.063 Hz	98.51

Como se puede observar en las tablas la aproximación entre un análisis de pórtico plano y pórtico 3D es mayor al 98% siendo en el modelo de altura de forjados igual a 10cm la mayor aproximación con un promedio de 98.6%; esto se debe a que el modelo de altura 10 cm es más flexible y representa con mayor exactitud el pórtico de cortante.

Se indica además que las frecuencias naturales obtenidas en este análisis no están afectadas por el amortiguamiento del sistema.





3.5.2 ANALISIS MODAL DYNAMICS ANALYSIS

El análisis “Modal Dynamics” o del modo dinámico da la respuesta de la estructura frente a una acción dinámica impuesta. El resultado lo representa como una función de tiempo basado en la carga que también depende del tiempo dado.

3.5.2.1 Procedimiento

El primer paso para este análisis es la extracción de las frecuencias propias, es decir, que se debe calcular las frecuencias propias antes de iniciar este análisis en Abaqus.

Para realizar este análisis también se utiliza el procedimiento general de “Lineal perturbation” y el paso “Modal dynamics”.

El tiempo analizado es de 19 segundos con una discretización para el tiempo de 0,002 segundos. Abaqus realiza la discretización del tiempo así como se muestra en la figura 3.10:

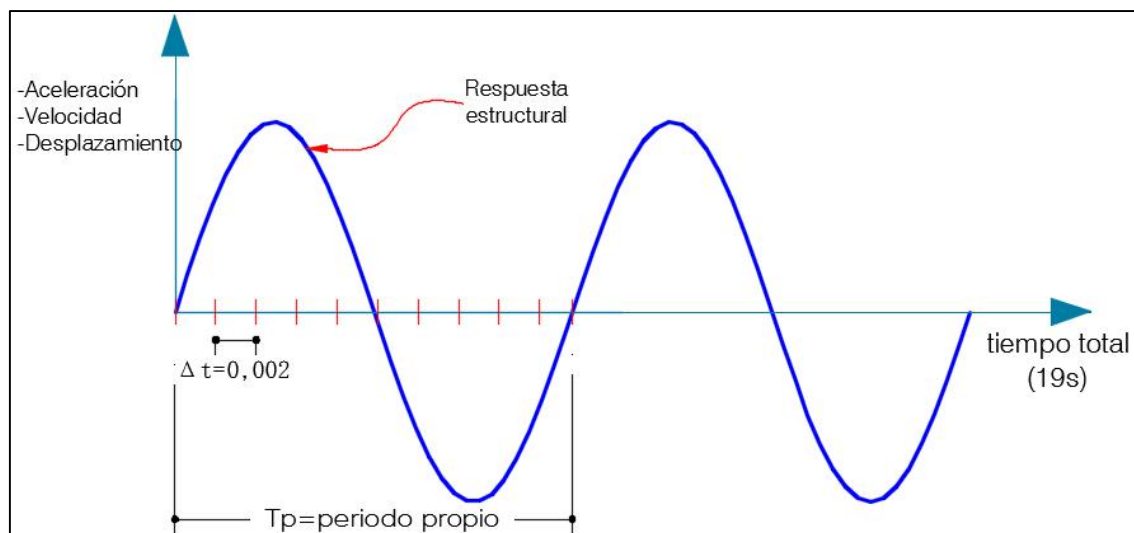
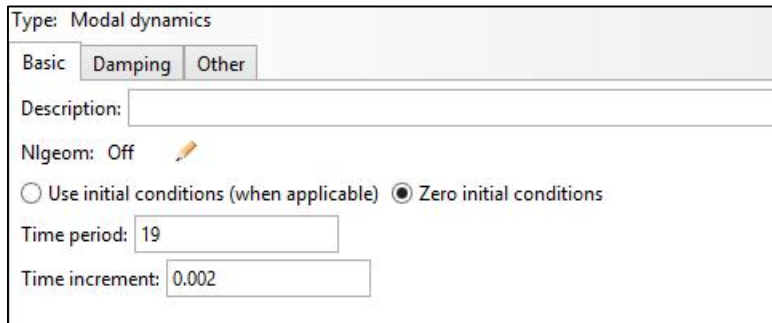


Figura 3.10: ANÁLISIS MODAL DYNAMIC-Definición de tiempo total y discretización del periodo

En la figura 3.11 se asigna en Abaqus el tiempo total en que se realiza el análisis y el incremento o discretización del mismo:



Type: Modal dynamics

Basic Damping Other

Description:

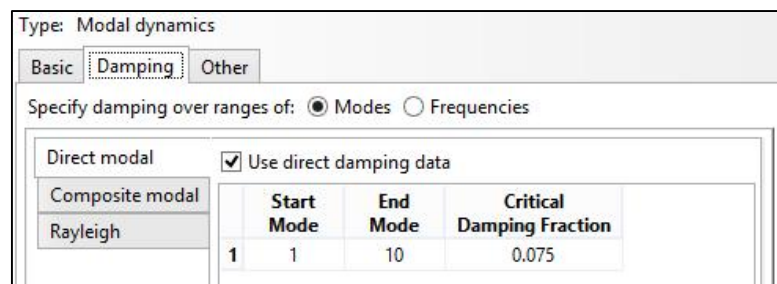
Nlgeom: Off

☐ Use initial conditions (when applicable) ☒ Zero initial conditions

Time period: 19

Time increment: 0.002

Figura 3.11: ANÁLISIS MODAL DYNAMIC- Asignación del tiempo total de análisis y del incremento del tiempo



Type: Modal dynamics

Basic Damping Other

Specify damping over ranges of: ☒ Modes ☐ Frequencies

Direct modal ☒ Use direct damping data

Start Mode	End Mode	Critical Damping Fraction
1	10	0.075

Figura 3.12: ANÁLISIS MODAL DYNAMIC- Asignación porcentaje de amortiguamiento

El porcentaje de amortiguamiento del crítico utilizado es de 7,5% para el edificio de H=10cm y de 1,1% para el edificio de H=18cm valores hallados en el ensayo de vibración libre que se detallará en el capítulo siguiente.

En la figura 3.12 los datos de entrada indicados son:

- Start mode: se coloca 1 porque indica desde que modo propio se desea que afecte la fracción de amortiguamiento crítico en este caso empieza del modo 1
- End Mode: Indica hasta que modo actúa la fracción de amortiguamiento crítico, en este caso actúa hasta el modo propio 10 que es el valor solicitado en el análisis de frecuencias propias.

En caso que se definan diferentes porcentajes de amortiguamiento Abaqus realiza la siguiente aproximación:

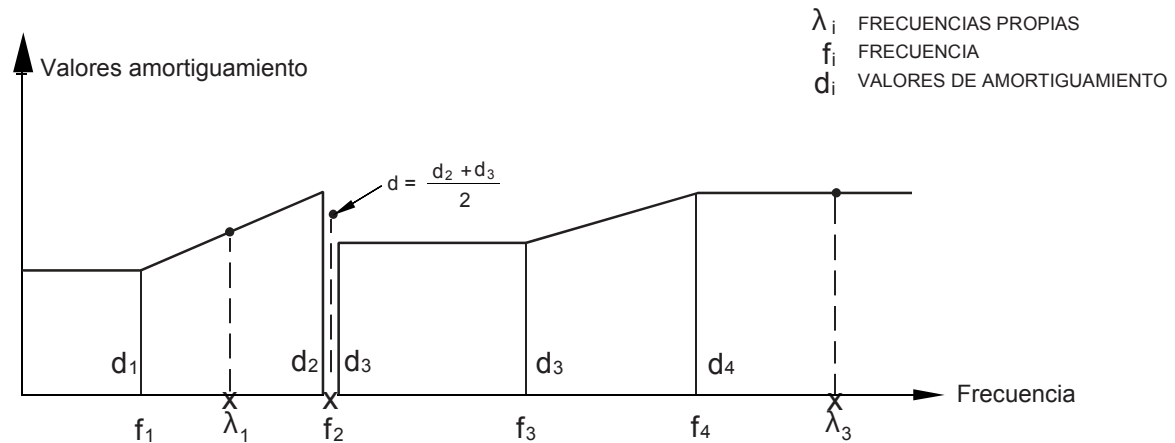


Figura 3.13: COEFICIENTES DE FRECUENCIA ESPECIFICADOS PARA DIFERENTES RANGOS DE FRECUENCIA

3.5.2.2 Definición de amplitud

Una vez terminado el paso uno en el que se calcula las frecuencias propias del sistema, el siguiente paso es definir la carga aplicada, en este caso se aplica una aceleración que depende del tiempo y está dada por una función armónica.

La carga aplicada está definida por la siguiente función:

$$F(t) = A * \text{sen}(\bar{\omega}_1 * t) \quad (3.1)$$

Donde:

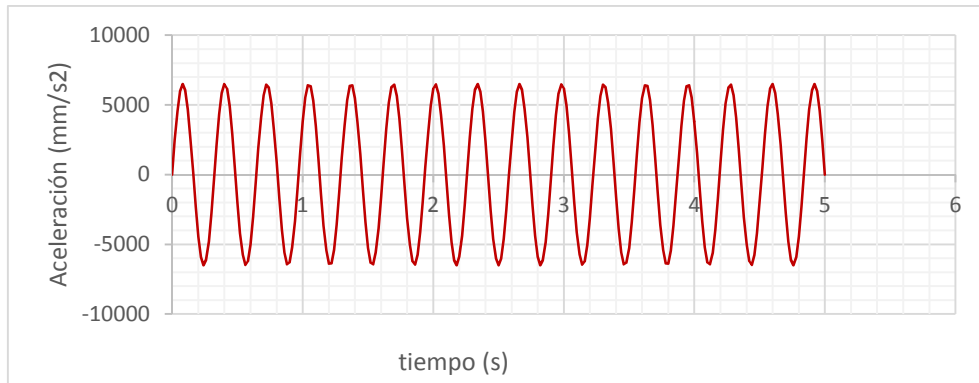
A = amplitud de las aceleración impuesta en milímetro por segundo cuadrado (mm/s^2)

$\bar{\omega}_1$ = frecuencia de la carga aplicada en radianes

t = tiempo en segundos

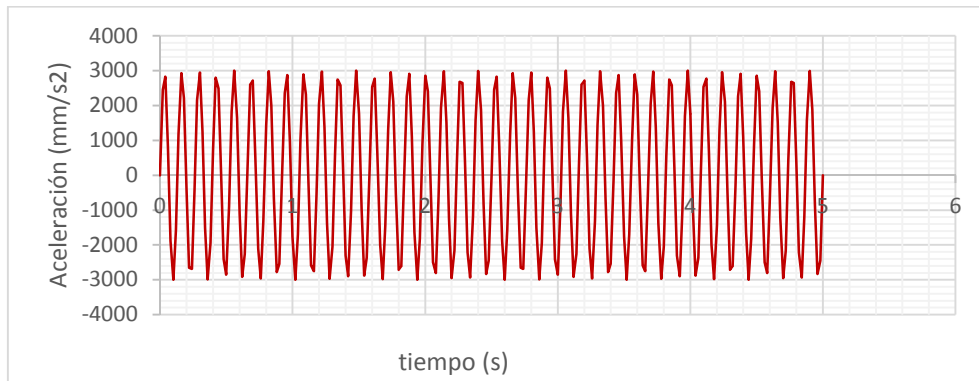
La definición de las cargas fue realizada para frecuencias cercanas a las frecuencias propias halladas en el primer análisis con el objetivo de hallar valores cercanos a la resonancia.

En la figura 3.14 y 3.15 se observa la señal aplicada cercana a la primera frecuencia propia, aplicada durante un periodo de 19 segundos, se indica que el tiempo de aplicación de la carga es el mismo tiempo con el que mostrará los resultados de respuesta de la estructura. Los datos que caracterizan a la señal son:



Amplitud=6500
Frecuencia=3,1Hz

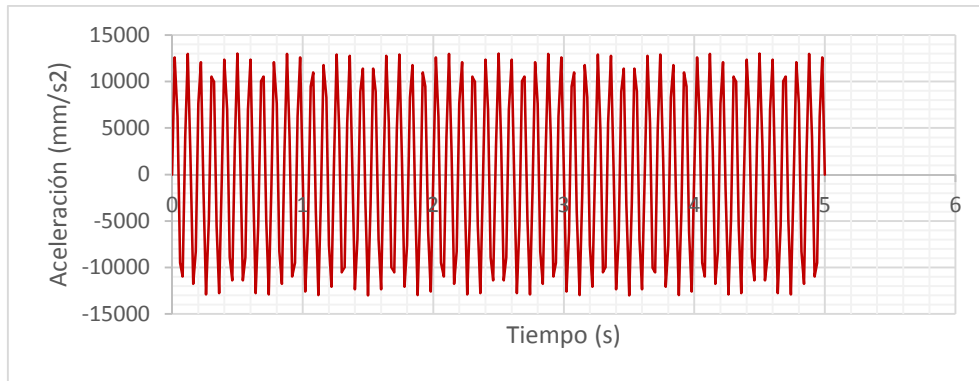
Figura 3.14: ACELERACIÓN APLICADA PARA PRIMERA FRECUENCIA PROPIA H=10cm



Amplitud=3000
Frecuencia=7,6Hz

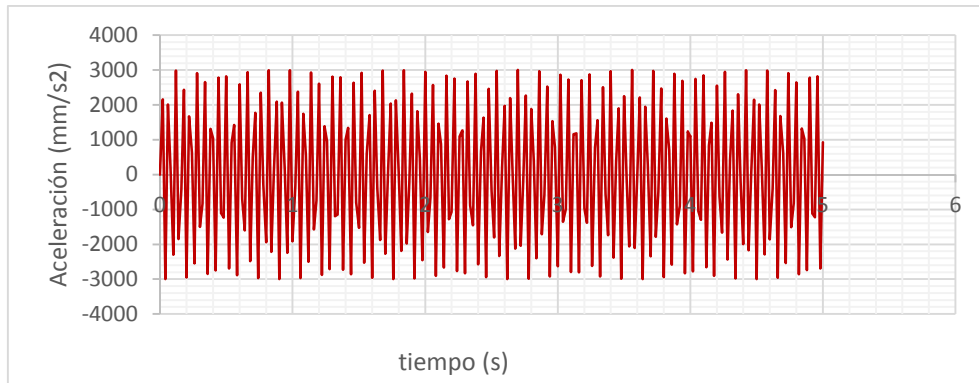
Figura 3.15: ACELERACIÓN APLICADA PARA PRIMERA FRECUENCIA PROPIA H=18cm

En la figura 3.16 y 3.17 se muestra la señal aplicada para la segunda frecuencia propia aplicada también para un periodo de 19 segundos. Los datos característicos de la señal son:



Amplitud=13000
Frecuencia=10,5Hz

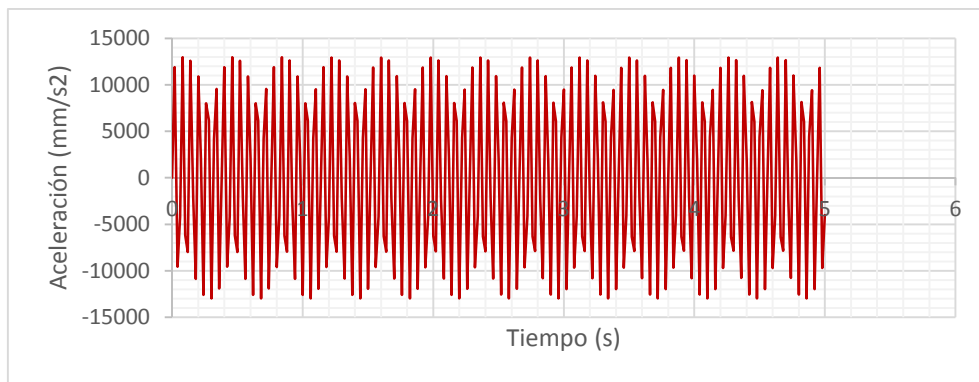
Figura 3.16: ACELERACIÓN APLICADA PARA SEGUNDA FRECUENCIA PROPIA H=10cm



Amplitud=3000
Frecuencia=18,6Hz

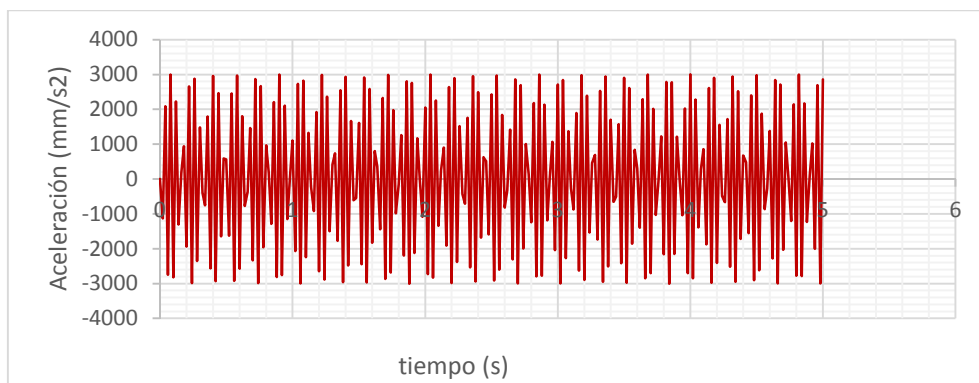
Figura 3.17: ACELERACIÓN APLICADA PARA SEGUNDA FRECUENCIA PROPIA H=18cm

En la figura 3.18 y 3.19 se muestra la señal aplicada para la tercera frecuencia propia aplicada en 19 segundos de tiempo y con los siguientes datos característicos:



Amplitud=13000
Frecuencia=15,8Hz

Figura 3.18: ACELERACIÓN APLICADA PARA TERCERA FRECUENCIA PROPIA H=10cm



Amplitud=3000
Frecuencia=28,1Hz

Figura 3.19: ACELERACIÓN APLICADA PARA TERCERA FRECUENCIA PROPIA H=18cm

Cada una de estas señales es colocada en el módulo “Amplitudes” de Abaqus en la opción “tabular” que quiere decir que los datos son definidos por ejes coordenados (x,y) y estos datos son importados tal como se muestra en la figura 3.20

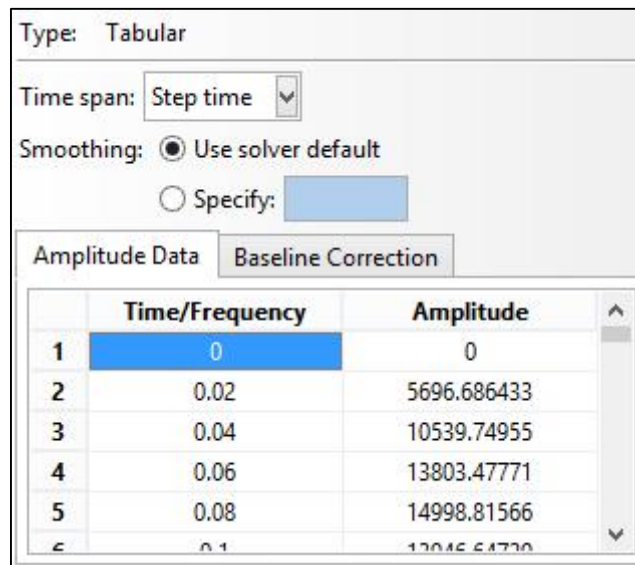


Figura 3.20: DEFINICIÓN DE AMPLITUDES EN ABAQUS

Como se observa el incremento de tiempo utilizado para la definición de la señal es de 0,02 segundos por tanto se usa un valor por defecto de la opción “Smoothing”.

3.5.2.3 Definición de movimiento en la base – Carga aplicada

Para la definición del punto de aplicación de la carga definida por la amplitud en el paso anterior se procede a definir el movimiento de la base editando directamente en la opción “Edit keywords”:

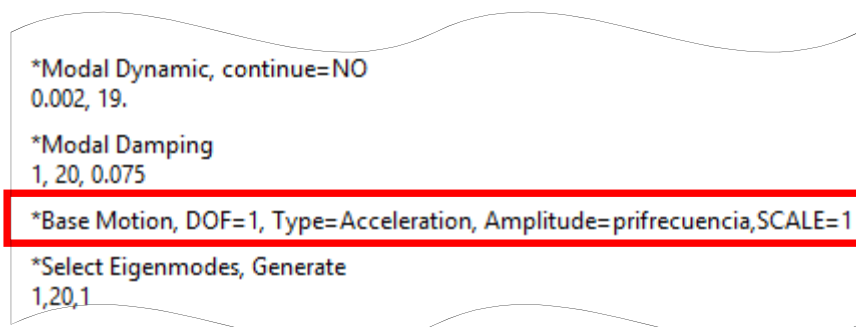


Figura 3.21: DEFINICIÓN DE MOVIMIENTO EN LA BASE MODAL DYNAMIC

El detalle de la definición del movimiento en la base presentado en la figura 3.21 es:

- * Indica la entrada de datos en Abaqus
- Base Motion: indica el punto de aplicación de la carga definida por la amplitud
- DOF: indica el grado de libertad que regirá al movimiento de la base en este caso indica 1 porque se refiere al primer grado de libertad es decir movimiento en el eje “X”.

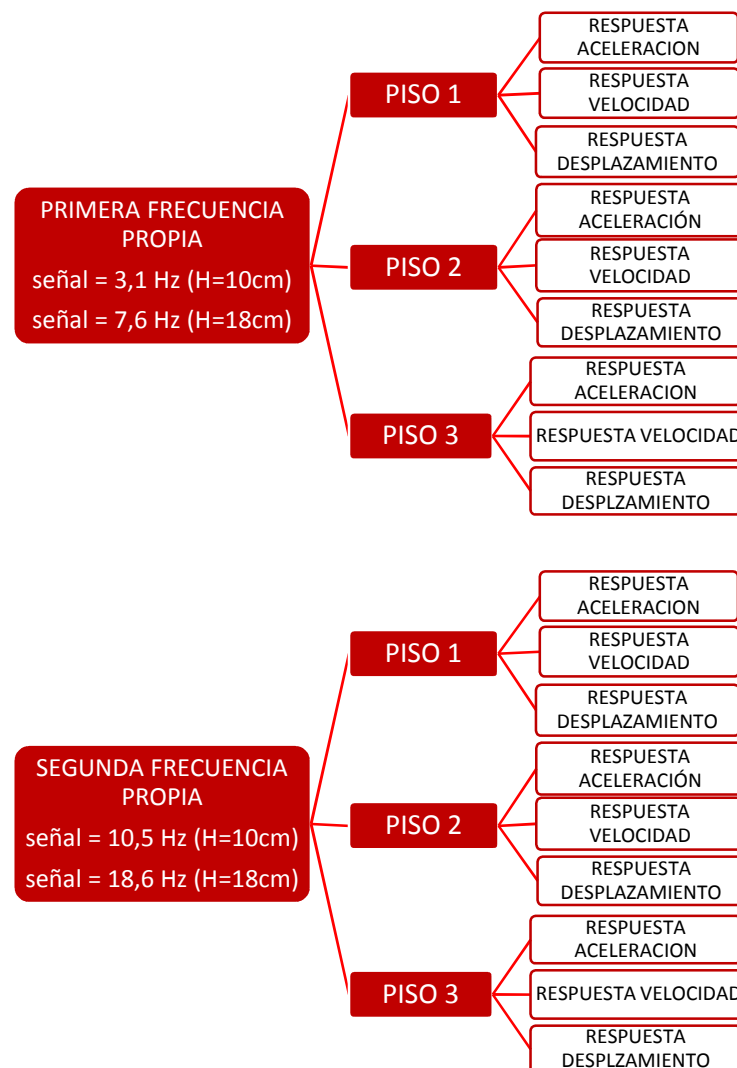
- Type: indica el tipo de la carga que se aplica, en este caso se coloca acceleration y Abaqus integrará esta función y calculará las velocidades y posteriores desplazamientos.
- Amplitude: se refiere a la amplitud utilizada para definir la carga aplicada para este modelo se utilizó el nombre de “prifrecuencia”.
- SCALE: se refiere a la escala que tiene la carga aplicada, en este caso no tiene escala por tanto el valor colocado es 1.

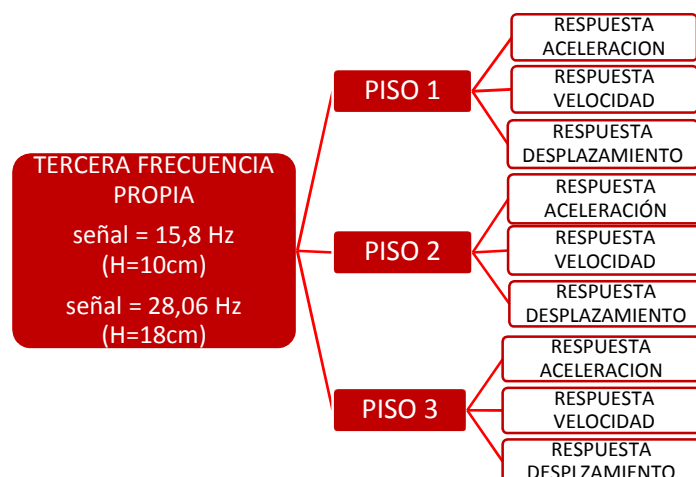
Se genera este movimiento para todos los valores de las frecuencias propias solicitadas en el análisis anterior y se obtienen los resultados.

3.5.2.4 Obtención de resultados - Pos proceso

La obtención de resultados se realizó para cada señal introducida, es decir en las tres frecuencias propias, y para cada piso.

En resumen los resultados se presentan de acuerdo al siguiente esquema:





Para el mejor entendimiento se presenta la tabla 3.9 y 3.10 el resumen de las respuestas obtenidas para ambos edificios respectivamente:

Tabla 3.9: RESUMEN DE RESPUESTA DEL ANALISIS MODAL DYNAMIC H=10cm

Nº Frecuencia	Nº Piso	Frecuencia (Hz)	Amplitud Frecuencia Propia H=10cm		
			Aceleración (mm/s ²)	Velocidad (mm/s)	Desplazamiento (mm)
Primera Frecuencia	Piso 1	3.13	5970.00	308.90	15.80
	Piso 2	3.13	10515.70	540.70	27.71
	Piso 3	3.13	14529.50	744.35	37.66
Segunda Frecuencia	Piso 1	12.50	27531.50	442.87	7.64
	Piso 2	12.50	19623.30	312.98	3.98
	Piso 3	12.50	29994.20	463.91	6.74
Tercera Frecuencia	Piso 1	16.60	17334.80	168.88	1.53
	Piso 2	16.60	18312.60	164.90	1.62
	Piso 3	16.60	12362.70	123.28	0.99

Tabla 3.10: RESUMEN DE RESPUESTA DEL ANALISIS MODAL DYNAMIC H=18cm

Nº Frecuencia	Nº Piso	Frecuencia (Hz)	Amplitud Frecuencia Propia H=18cm		
			Aceleración (mm/s ²)	Velocidad (mm/s)	Desplazamiento (mm)
Primera Frecuencia	Piso 1	7.69	4947.7	98.0763	2.04
	Piso 2	7.69	9540.64	200.289	4.29
	Piso 3	7.69	13254.4	277.845	5.89
Segunda Frecuencia	Piso 1	20.00	29190.20	249.45	2.14
	Piso 2	20.00	16907.50	143.93	1.24
	Piso 3	20.00	19574.70	166.62	1.44
Tercera Frecuencia	Piso 1	33.33	6234.65	35.54	0.23
	Piso 2	33.33	7586.36	44.07	0.29
	Piso 3	33.33	2646.72	13.56	0.09

Como ejemplo se presenta gráficamente los resultados obtenidos para la frecuencia más baja que es la primera y para el piso 3 que presentó mayor amplitud en desplazamientos.

Piso 3:

En la figura 3.22 se muestra el punto de referencia tomado para la obtención de datos, se extraen datos de aceleración en mm/s^2 , velocidad en mm/s y desplazamiento en milímetros (mm) y se muestran en las figuras 3.23 y 3.24:

Piso 3-Primera Frecuencia propia:

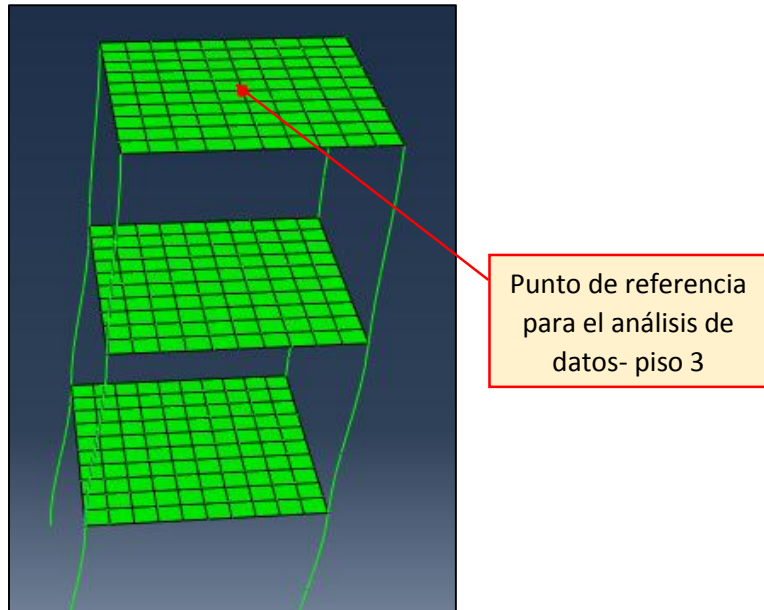


Figura 3.22: PUNTO DE REFERENCIA PARA LA OBTENCION DE DATOS – PISO 3

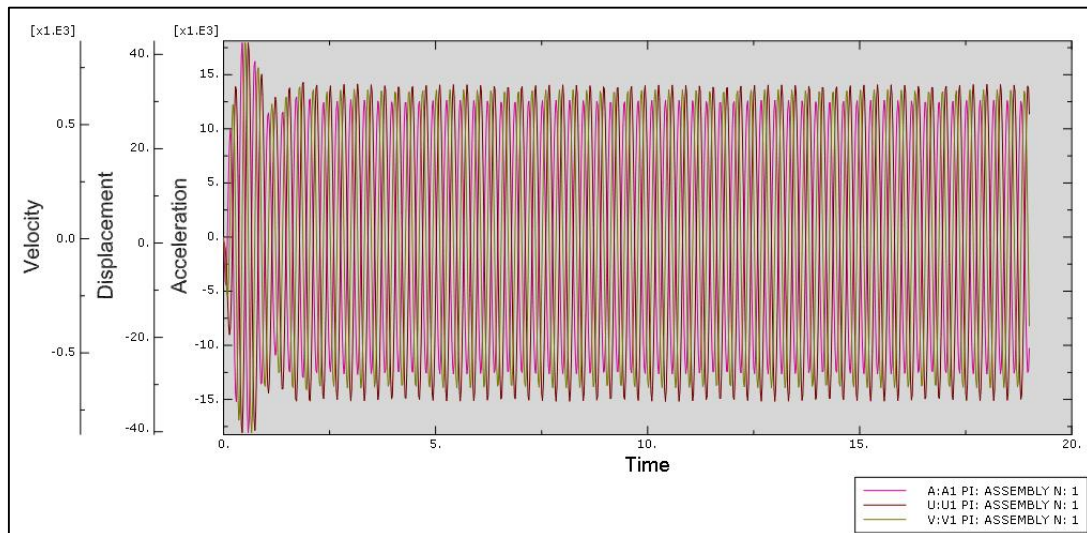


Figura 3.23: RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA EN ANALISIS MODAL DYNAMIC-PRIMERA FRECUENCIA-PISO3
H=10cm

- ACELERACIÓN EN mm/s^2
- VELOCIDAD EN mm/s
- DESPLAZAMIENTO EN mm
- TIEMPO EN s

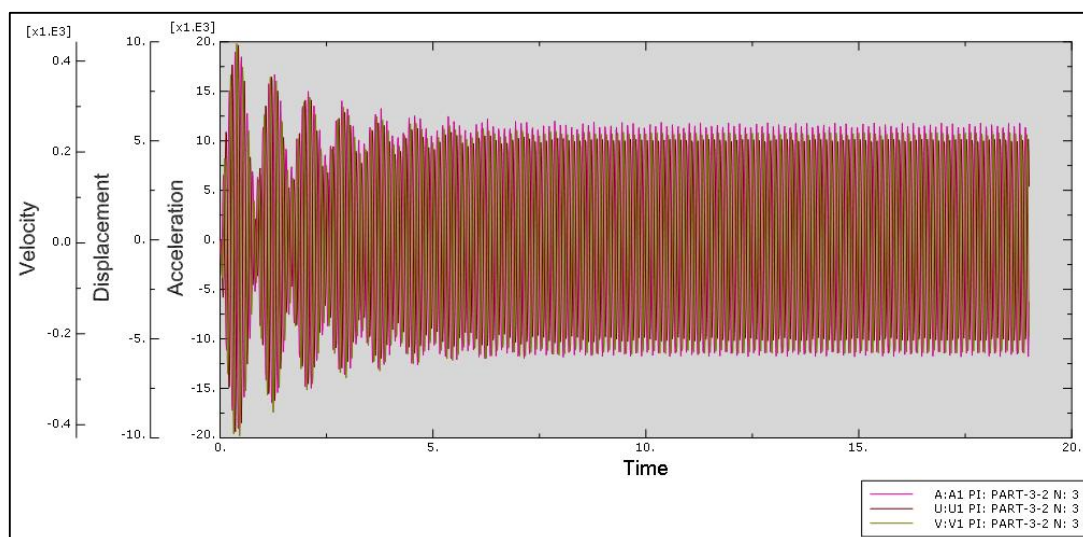


Figura 3.24: RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA EN ANALISIS MODAL DYNAMIC-PRIMERA FRECUENCIA-PISO3
H=18cm

- ACELERACIÓN EN mm/s^2
- VELOCIDAD EN mm/s
- DESPLAZAMIENTO EN mm
- TIEMPO EN s

Piso 3 – Segunda Frecuencia Propia:

En las figuras 3.25 y 3.26 se muestran la respuesta de la estructura para la segunda frecuencia propia del piso 3:

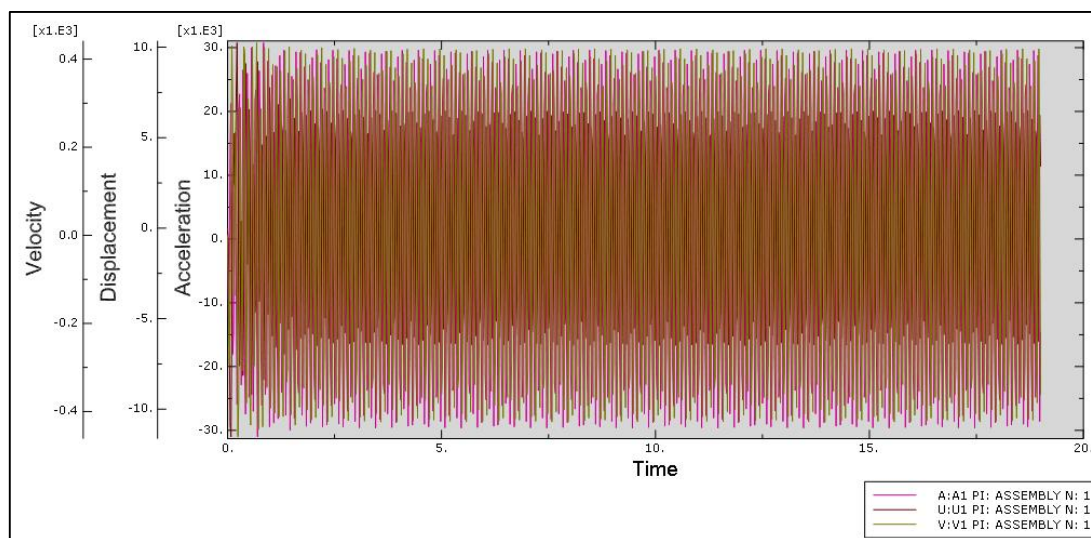


Figura 3.25: RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA EN ANALISIS MODAL DYNAMIC-SEGUNDA FRECUENCIA-PISO 3
H=10cm

- ACELERACIÓN EN mm/s^2
- VELOCIDAD EN mm/s
- DESPLAZAMIENTO EN mm
- TIEMPO EN s

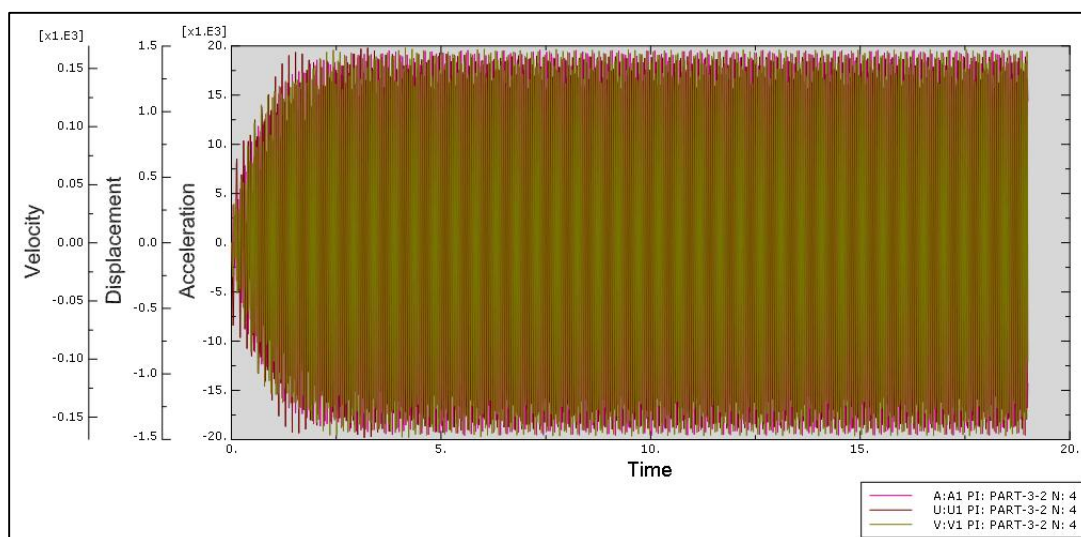


Figura 3.26: RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA EN ANALISIS MODAL DYNAMIC-SEGUNDA FRECUENCIA-PISO 3
H=18cm

- ACELERACIÓN EN mm/s^2
- VELOCIDAD EN mm/s
- DESPLAZAMIENTO EN mm
- TIEMPO EN s

Piso 3 – Tercera Frecuencia Propia

En las figuras 3.27 y 3.28 se muestran la respuesta de la estructura para la tercera frecuencia propia del piso 2:

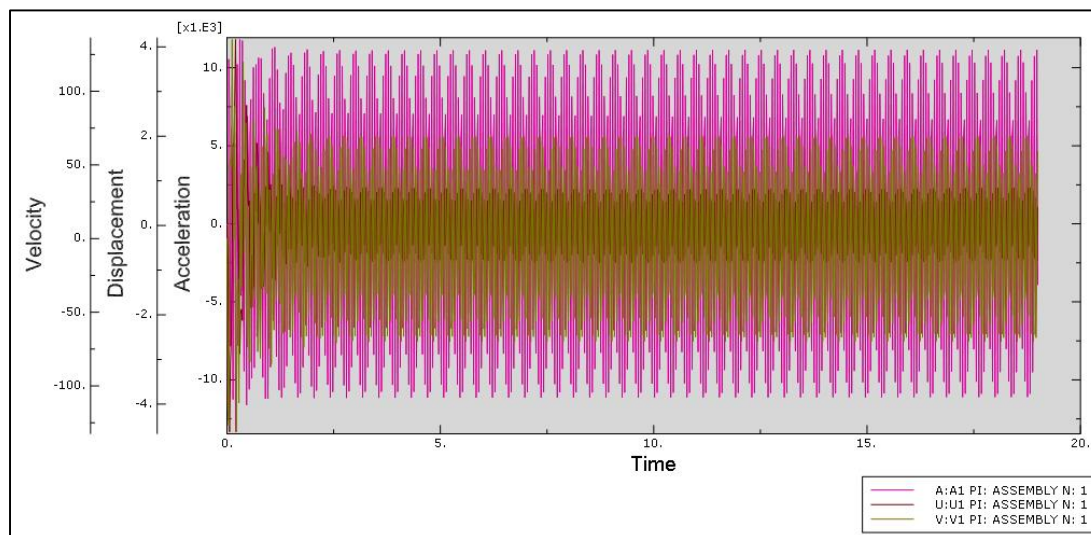
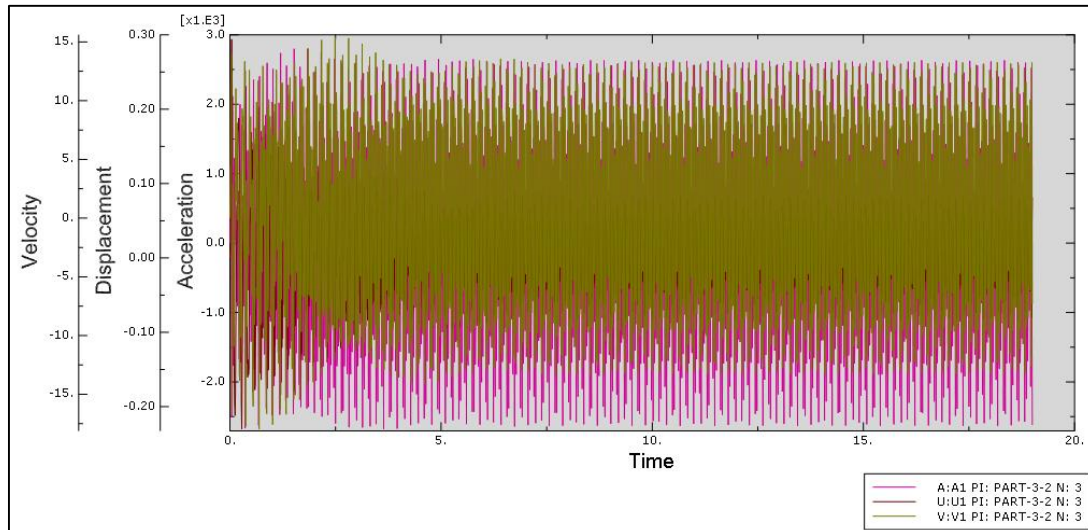


Figura 3.27: RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA EN ANALISIS MODAL DYNAMIC-TERCERA FRECUENCIA-PISO 3
H=10cm

- ACELERACIÓN EN mm/s^2
- VELOCIDAD EN mm/s
- DESPLAZAMIENTO EN mm
- TIEMPO EN s



**Figura 3.28: RESPUESTA DE LA ESTRUCTURA EN ANALISIS MODAL DYNAMIC-TERCERA FRECUENCIA-PISO 3
H=18cm**

- ACELERACIÓN EN mm/s²
- VELOCIDAD EN mm/s
- DESPLAZAMIENTO EN mm
- TIEMPO EN s

Como se puede observar en todas las figuras mostradas en los primeros dos segundos de análisis se presenta la respuesta total de la estructura luego de ello la respuesta es estacionaria; ello se observa con una variación de amplitudes en la respuesta de desplazamientos en todos los casos.

3.5.3 ANALISIS STEADY STATE DYNAMICS, MODAL

Este procedimiento también es un análisis de perturbación lineal, quiere decir que está dentro del rango elástico lineal, utilizado en este caso para una excitación armónica.

El análisis Steady State Dynamics Modal obtiene las máximas amplitudes de la respuesta en el estado estacionario de la estructura para una carga dinámica aplicada y a diferentes frecuencias, es decir, realiza un barrido de frecuencias para una carga aplicada a diferentes frecuencias; para ello utiliza los valores de las frecuencias propias por ello se denomina Modal.

Los cálculos que realiza los obtiene en base a la extracción de frecuencias propias obtenidas en el primer análisis, es decir, que necesariamente debe realizarse el primer análisis de obtención de frecuencias para poder desarrollar este procedimiento.

Este procedimiento es menos preciso que la solución directa, presenta un sesgo en las máximas amplitudes de las frecuencias propias, pero computacionalmente es el más barato.

3.5.3.1 Procedimiento

El primer paso, así como se explicó en el ítem anterior, es la obtención de las frecuencias propias.

Se define un rango de frecuencias dentro del cual Abaqus dará resultados en cada frecuencia propia comprendida en el rango; se define el número de puntos existentes entre cada frecuencia propia comprendida en el rango de frecuencias dadas y el tipo de división.

Para una mejor comprensión de este procedimiento se muestra la figura 3.29, extraída del manual de usuario de Abaqus.

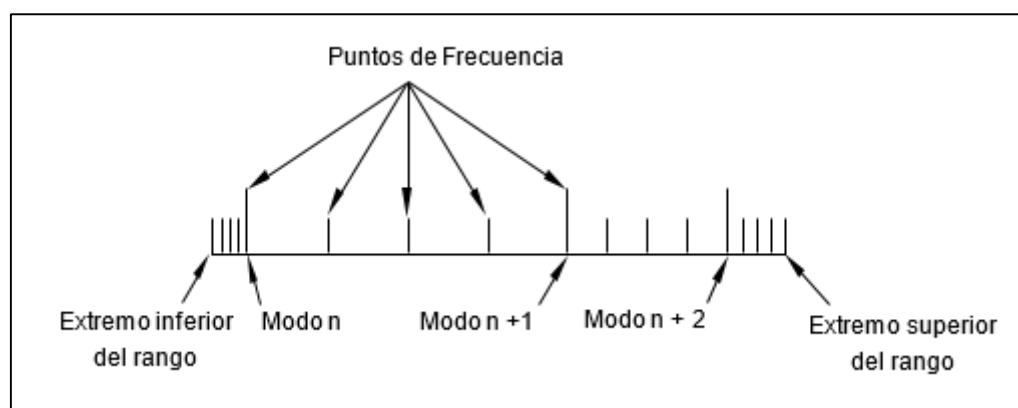


Figura 3.29: DIVISIÓN DE RANGO DE FRECUENCIAS PROPIAS PARA UN INTERVALO DE 5 PUNTOS

Para el edificio estudiado se evaluó para 20 puntos en el intervalo de frecuencias propias.

Otro parámetro importante es la definición del tipo de espaciamiento del intervalo definido anteriormente. Este parámetro se puede utilizar para proporcionar una menor separación de los puntos de resultado ya sea hacia el centro o hacia los extremos de cada intervalo de frecuencia.

En la figura 3.30 se observa algunos ejemplos del tipo de espaciamiento del intervalo de puntos de frecuencia: “Bias”

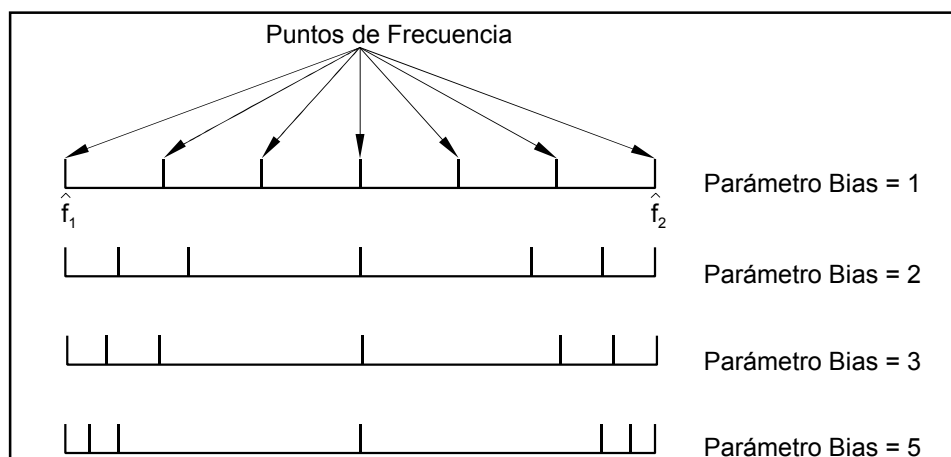


Figura 3.30: EFECTO DEL PARAMETRO “BIAS” EN EL ESPACIAMIENTO DEL NÚMERO DE PUNTOS DE FRECUENCIA

En el edificio estudiado se utiliza el parámetro de Bias igual a 3 por presentar una mayor aproximación con los resultados obtenidos en laboratorio.

En la figura 3.31 se muestran los datos de entrada para este procedimiento:

(a) Definición de intervalo de frecuencias

	Lower Frequency	Upper Frequency	Number of Points	Bias
1	0	17	20	3

(b) Amortiguamiento

	Start Mode	End Mode	Critical Damping Fraction
1	1	10	0.075

Figura 3.31: ANÁLISIS STEADY STATE DYNAMIC- (a) Definición de intervalo de frecuencias y (b) de amortiguamiento

Para el caso del edificio de $H=10\text{cm}$ en la figura 3.31(a) el límite inferior del rango es cero para que el análisis empiece desde la frecuencia más baja (primera frecuencia propia= $3,89\text{Hz}$) y el límite superior es 17 ya que la última frecuencia propia es $15,86\text{Hz}$. Entonces de acuerdo a los datos de entrada el barrido de frecuencias incluye todos los valores de las frecuencias propias que se solicitaron. El mismo procedimiento se realiza para el edificio de $H=18\text{cm}$.

Se coloca la fracción de amortiguamiento crítico de manera similar que en el caso del análisis “Modal Dynamic” como se observa en la figura 3.31 (b).

3.5.3.2 Definición de la amplitud

La amplitud de la carga aplicada es una función armónica con una serie de frecuencias distintas, para realizar de manera correcta el barrido de frecuencias.

La variación de la carga se presenta en la figura 3.32:

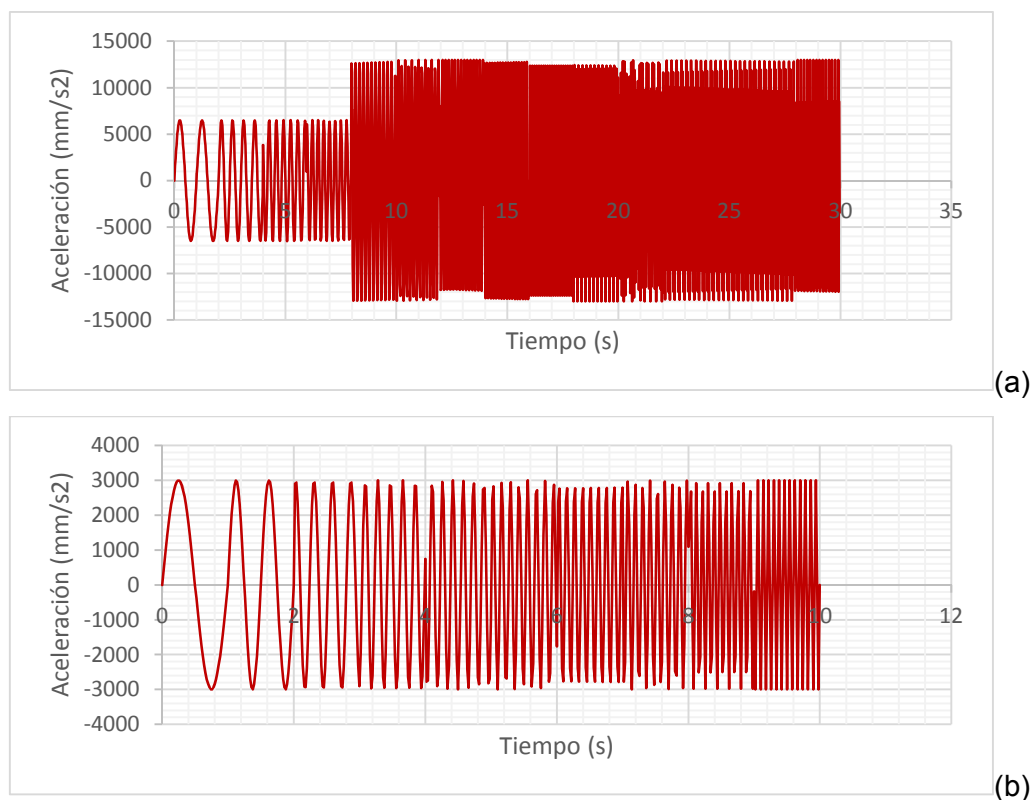


Figura 3.32: ACCELERACIÓN APLICADA ANALISIS STEADE STATE DYNAMIC (a) H=10cm (b) H=18cm

Se definió frecuencias diferentes cada 2 segundos, las frecuencias son variables de acuerdo a las cargas aplicadas en el ensayo. En la siguiente tabla se muestra las frecuencias y amplitudes definidas para este procedimiento.

Tabla 3.11: FRECUENCIAS DE CARGA APLICADA SISTEMA PARA S.S. DYNAMIC

H=10cm		H=18cm	
Frecuencia (Hz.)	Amplitud (mm/s ²)	Frecuencia (Hz.)	Amplitud (mm/s ²)
1	6500	1	3000
2	6500	2	3000
3.1	6500	3.57	3000
3.858	6500	5.26	3000
5.55	13000	6.25	3000
6.66	13000	7.6	3000
7.14	13000	8.33	3000
8.33	13000	8.93	3000
10.5	13000	11.11	3000
10.943	13000	12.5	3000
11.11	13000	18.61	3000
13.13	13000	28.06	3000
15.86	13000		
18.18	13000		
28.57	13000		

3.5.3.3 Definición de movimiento en la base – Carga aplicada

El movimiento en la base se define de la misma manera que en el procedimiento de “Modal Dynamic” en el módulo de “Edit Keywords” para el grado de libertad “1” definido por el movimiento en el eje “x” del tipo aceleración y sin ninguna reducción de escala.

3.5.3.4 Resultados Obtenidos – Pos proceso

La obtención de resultados se realiza para cada respuesta de un barrido de frecuencias en amplitudes de aceleración, desplazamiento y velocidad para ambos modelos:

Piso 1:

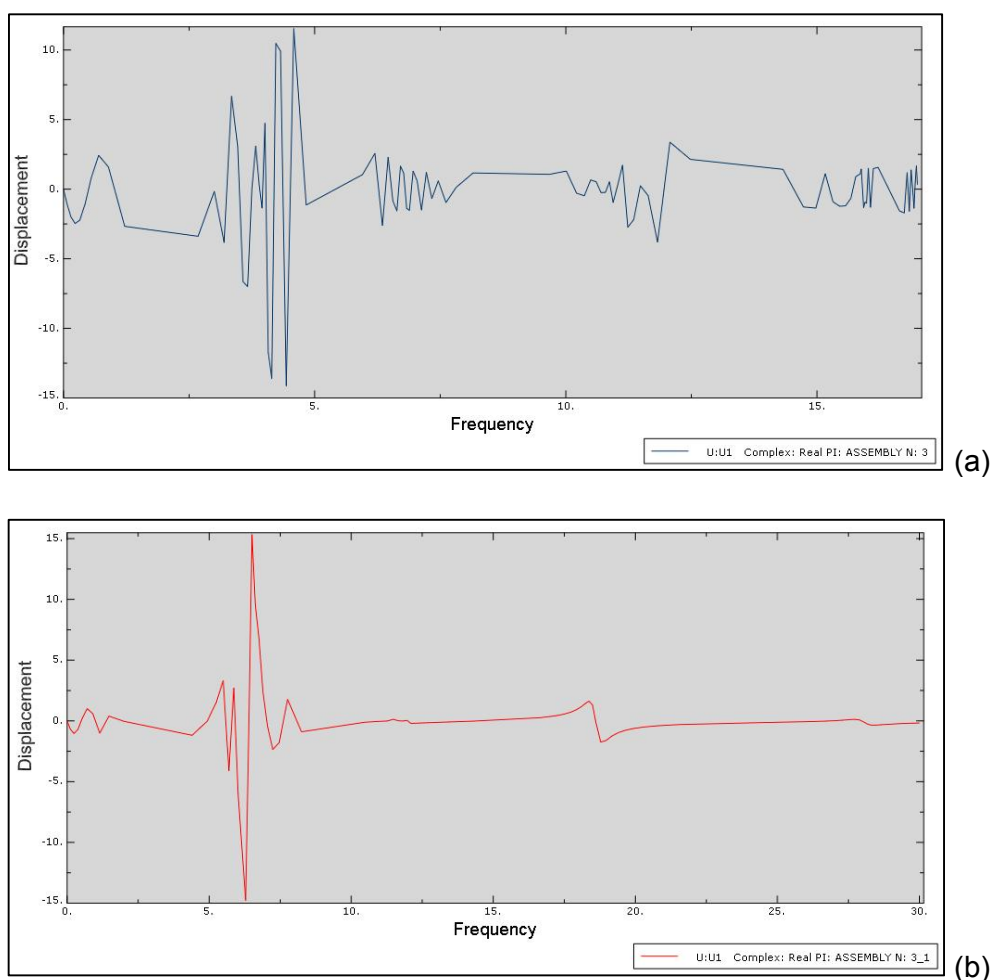


Figura 3.33: BARRIDO DE FRECUENCIAS: STEADY STATE DYNAMIC – PISO 1 (a) $H=10\text{cm}$ (b) $H=18\text{cm}$
 - FRECUENCIA EN Hz
 - DESPLAZAMIENTO EN mm

Piso 2:

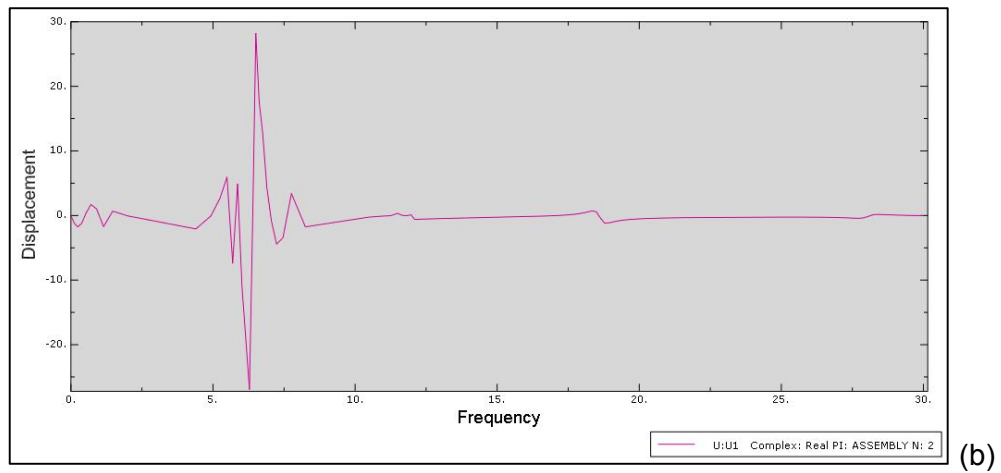
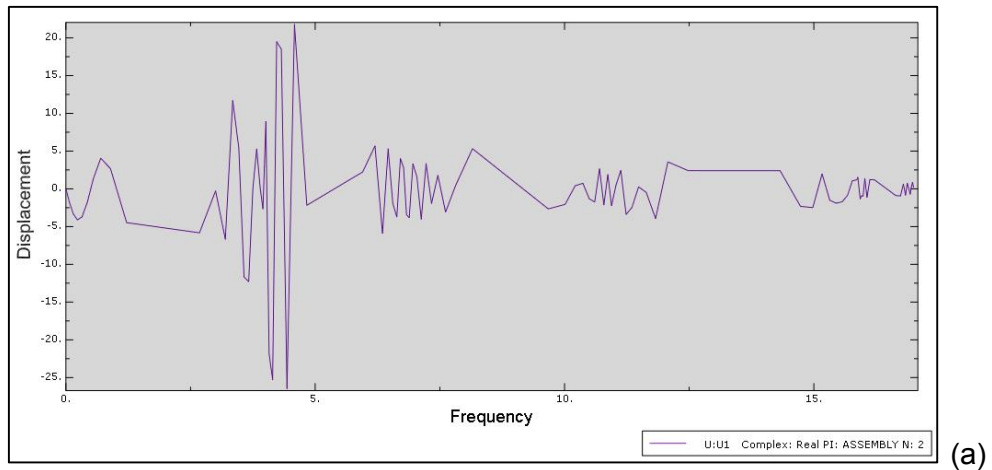
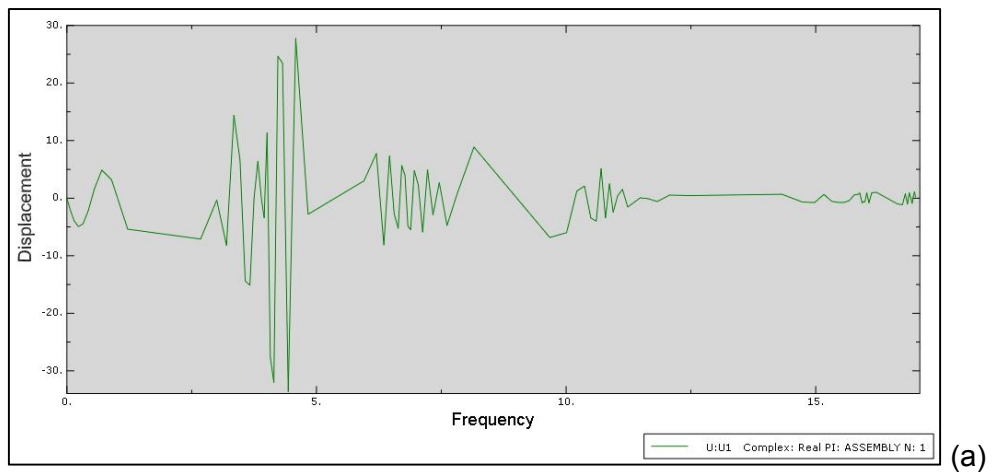


Figura 3.34: BARRIDO DE FRECUENCIAS: STEADY STATE DYNAMIC – PISO 2 (a) $H=10\text{cm}$ (b) $H=18\text{cm}$
 - FRECUENCIA EN Hz
 - DESPLAZAMIENTO EN mm

Piso 3:



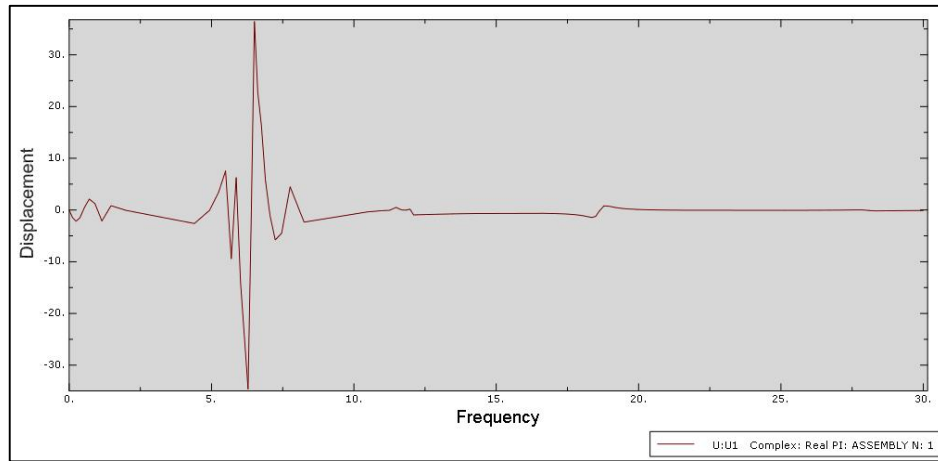


Figura 3.35: BARRIDO DE FRECUENCIAS: STEADE STATE DYNAMIC – PISO 3 (a) H=10cm (b) H=18cm
 - FRECUENCIA EN Hz
 - DESPLAZAMIENTO EN mm

Como se observa en las figuras 3.33-3.35 los valores incluyen amplitudes con valores negativos, entonces se extrae los datos y se obtiene el *valor absoluto*:

Edificio H=10cm

Piso 1:

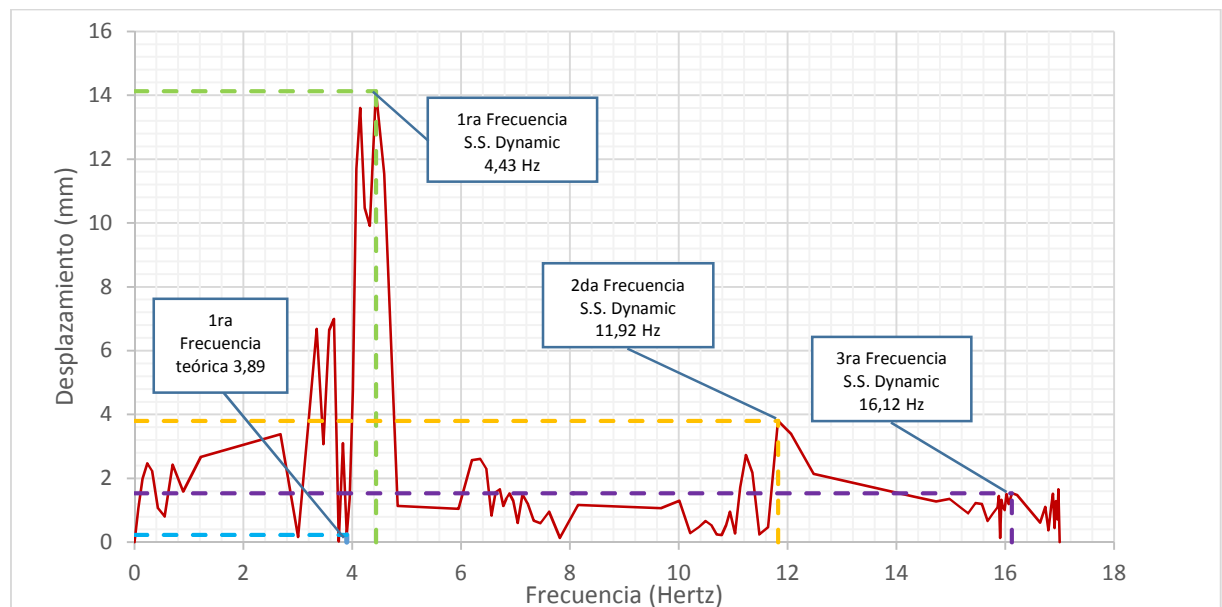


Figura 3.36: VALOR ABSOLUTO DE BARRIDO DE FRECUENCIAS: STEADE STATE DYNAMIC – PISO 1 H=10cm

En la figura 3.36 se observa que la frecuencia natural calculada en el procedimiento “Frequency” no coincide con la frecuencia de resonancia de este procedimiento (Steady State Dynamic).

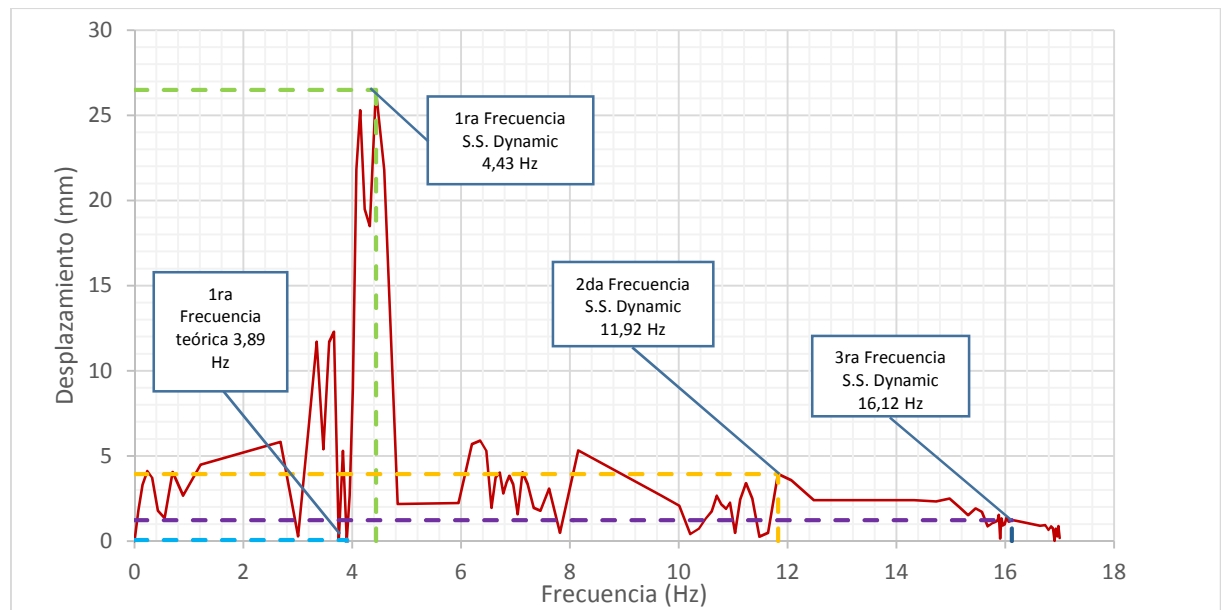
Piso 2:


Figura 3.37: VALOR ABSOLUTO DE BARRIDO DE FRECUENCIAS: STEADY STATE DYNAMIC – PISO 2 H=10cm

En la figura 3.37 se observa la misma diferencia de frecuencias observada en la figura 3.36 correspondiente al piso 1.

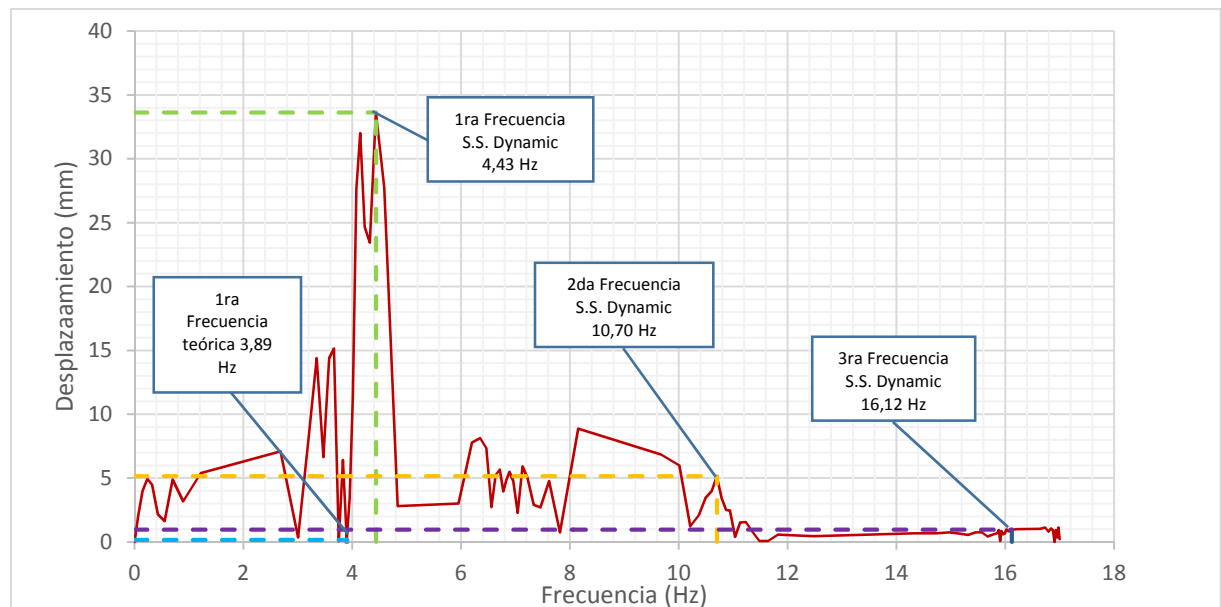
Piso 3:


Figura 3.38: VALOR ABSOLUTO DE BARRIDO DE FRECUENCIAS: STEADY STATE DYNAMIC – PISO 3 H=10cm

De la misma manera que el piso 1 y 2, en el piso 3 existe una variación de frecuencias que es aproximadamente en 12%. Al realizar una variación de la razón de amortiguamiento crítico se observó que la diferencia de frecuencias continuaba y variaba la amplitud del desplazamiento.

Edificio H=18cm

Para el edificio de altura H=18cm se presenta los siguientes resultados:

Piso 1:

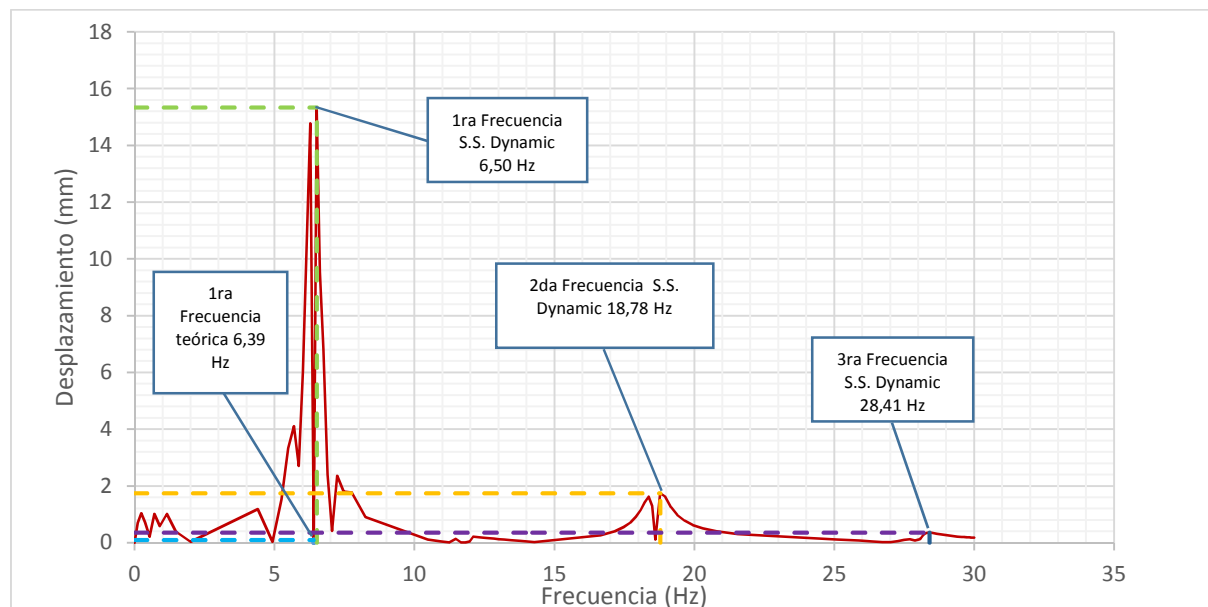


Figura 3.39: VALOR ABSOLUTO DE BARRIDO DE FRECUENCIAS: STEADE STATE DYNAMIC – PISO 1 H=18cm

Piso 2:

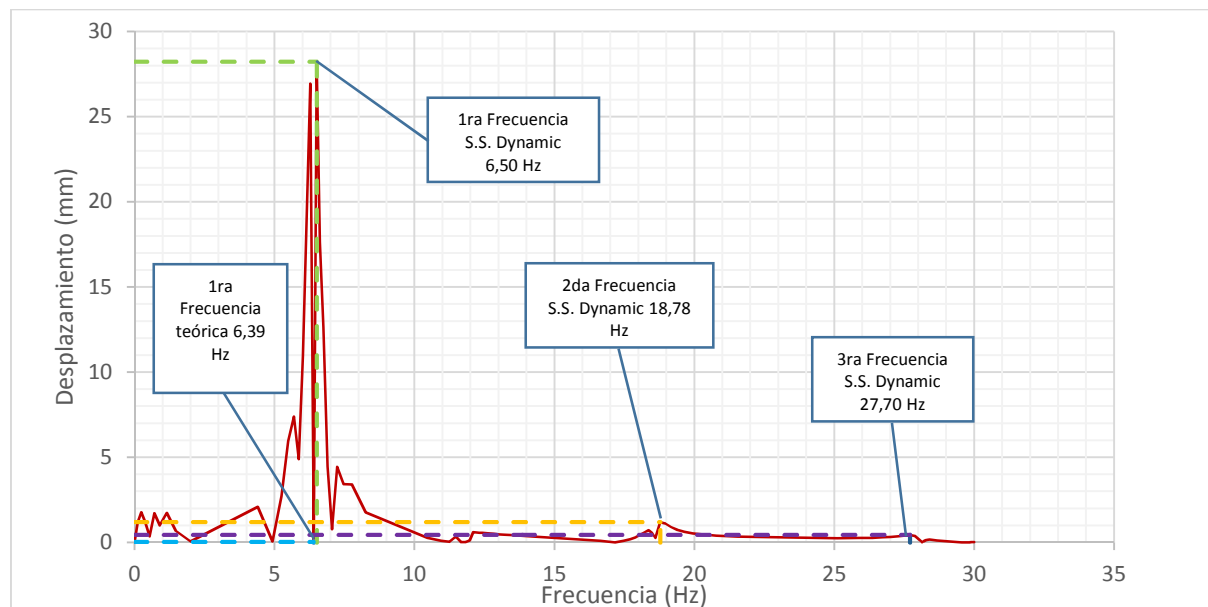


Figura 3.40: VALOR ABSOLUTO DE BARRIDO DE FRECUENCIAS: STEADE STATE DYNAMIC – PISO 2 H=18cm

Piso 3:

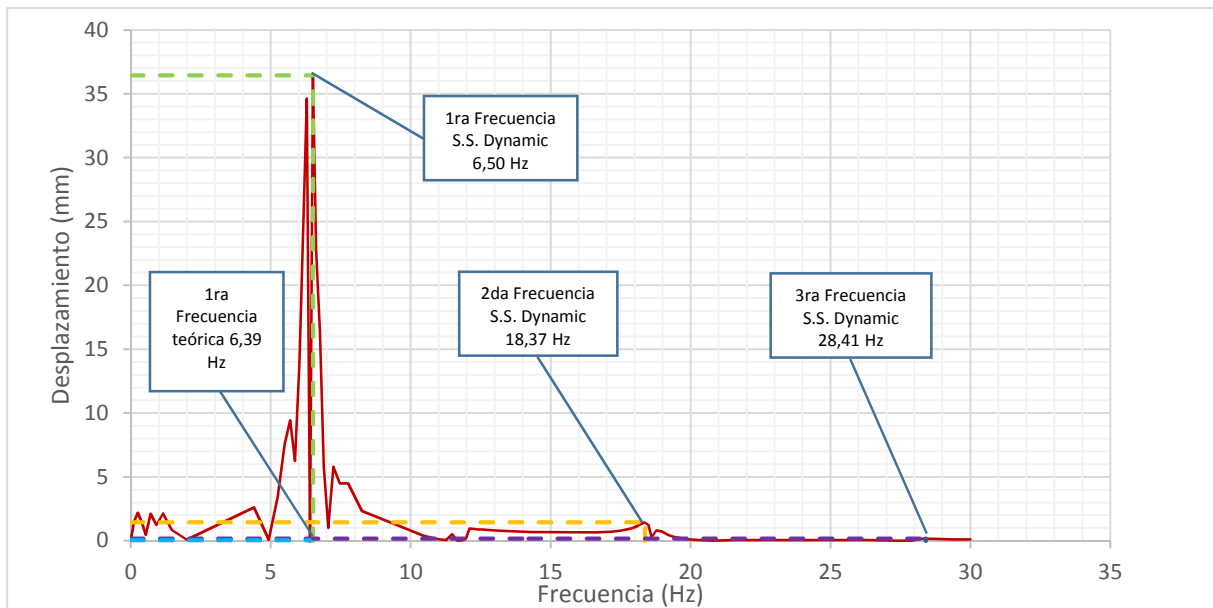


Figura 3.41: VALOR ABSOLUTO DE BARRIDO DE FRECUENCIAS: STEADY STATE DYNAMIC – PISO 3 H=18cm

En las figuras 3.39 al 3.41 se observa que la frecuencia natural calculada en el procedimiento uno de extracción de frecuencias de Abaqus no coincide exactamente con la frecuencia de resonancia del análisis dinámico del estado estacionario (Steady State Dynamic), el mismo caso que ocurre en el edificio de H=10cm. Pero en este caso se observa una menor variación entre las frecuencias (2%).

Se realizó una variación en la carga aplicada en la base, encontrándose sensibilidad en la obtención de frecuencias de resonancia, es decir, que para una carga exacta ambas frecuencias coinciden; sin embargo, se deja con la carga descrita anteriormente por ser la misma aplicada en la modelización experimental.

CAPÍTULO IV

ESTUDIO DEL MODELO EXPERIMENTAL

4. ESTUDIO DEL MODELO EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUCCIÓN

El ensayo del edificio a escala reducida se realizó con el objetivo de entender el comportamiento de un pórtico de cortante frente a fuerzas dinámicas aplicadas en la base.

La instrumentación, tanto para el ensamblaje del edificio así como los equipos necesarios para la medición de la respuesta estructural tiene como principio la aplicación de las nuevas tecnologías en instrumentación abierta y con ello procedimientos que solamente se aplicaban en procesos industriales:

- El diseño se realizó en Abaqus (descrito en el capítulo anterior), los materiales utilizados para la manufactura son accesibles para cualquier usuario.
- La instrumentación para la medición de respuestas estructurales fue Arduino Uno, Hardware abierto y accesible por ser de bajo costo.
- El funcionamiento de la instrumentación se realizó con información abundante existente en Internet.

En el presente capítulo se describen los materiales utilizados y el ensamblaje de los modelos a escala reducida; se describe el equipo utilizado, la instrumentación consistente en el equipo Arduino Uno; y finaliza con un plan de ensayo y la ejecución del mismo: ensayos de vibración libre, ensayos de vibración forzada y el barrido de frecuencias.

La realización de este ensayo permitió explorar diferentes opciones de materiales para la obtención de resultados con mayor exactitud; es así que se realizaron dos edificios con diferentes materiales uno de altura $H=10\text{cm}$ (flexible) y el otro de $H=18\text{cm}$ (rígido).

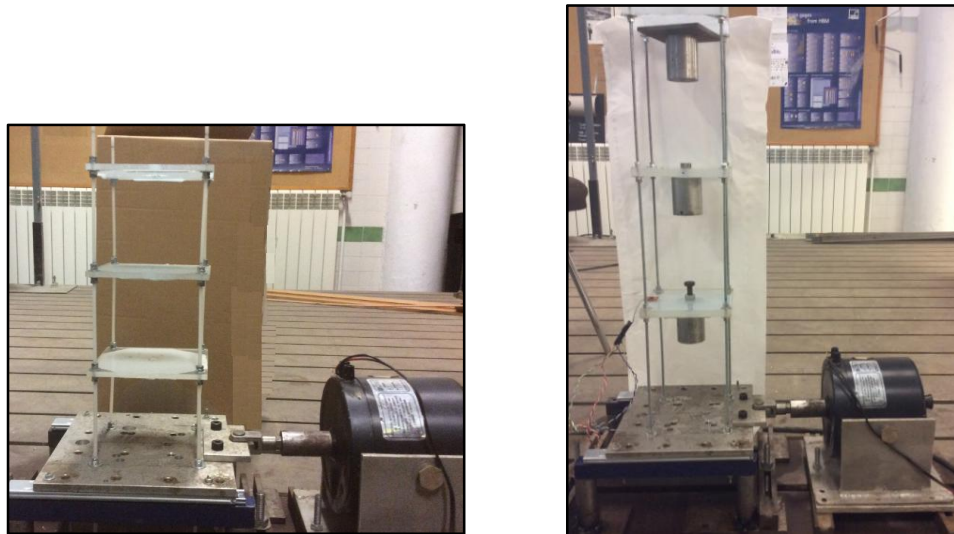


Figura 4.1: EDIFICIOS A ESCALA REDUCIDA PARA ENSAYOS

Se ensambló dos edificios a escala, edificio formado por tres niveles y cuatro columnas en cada nivel tal como se observa en la figura 4.1 el detalle de cada uno se describirá en los siguientes ítems.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAMBLAJE DEL EDIFICIO A ESCALA

Como ya se indicó se modelaron dos edificios uno con mayor flexibilidad que el otro. Los materiales utilizados fueron escogidos para que representen una mejor visualización y representen con mayor exactitud un comportamiento elástico lineal del sistema para hacerlo comparable con el modelo digital expuesto en el capítulo anterior.

Con respecto a costos, los materiales escogidos fueron lo más accesible posible, que fueron encontrados en ferreterías cercanas, manteniendo el principio de bajo costo de instrumentación.

4.2.1 EDIFICIO DE ALTURA $H=10\text{cm}$

Se realizó un edificio de tres plantas simétrico con altura entre cada piso de 10 centímetros. Los elementos utilizados en el ensamblaje de este edificio fueron los siguientes:

4.2.1.1 Pilares

Los pilares son de material plástico denominado Poliamida cuyo módulo de Young o de Elasticidad es aproximadamente 20 veces más pequeño que el hormigón armado, representando un material sumamente flexible. Los pilares son circulares roscados y de radio 4 milímetros.



Figura 4.2: VARILLA ROSCADA POLIAMIDA

Las propiedades mecánicas de la Poliamida se presentan en la tabla 4.1 [W1]:

Tabla 4.1: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA POLIAMIDA

POLIAMIDA 6 (GRILON) (HUMEDAD 2,5%)				
PROPIEDADES MECANICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
PESO ESPECIFICO	gr/cm ³	D-792	53479	1.14
RESIST. A LA TRACC.(FLUENCIA / ROTURA)	Kg/cm ²	D-638	53455	450 / --
RES. A LA COMPRESION (1 Y 2 % DEF)	Kg/cm ²	D-695	53454	150 / 280
RESISTENCIA A LA FLEXION	Kg/cm ²	D-790	53452	400
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	Kg.cm/cm ²	D-256	53453	NO ROMPE
ALARGAMIENTO A LA ROTURA	%	D-638	53455	200
MODULO DE ELASTICIDAD (TRACCION)	Kg/cm ²	D-638	53457	14000
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	72 - 76
COEF. DE ROCE ESTATICO S/ACERO		D-1894		0.31 a 0.54
COEF. DE ROCE DINAMICO S/ACERO		D-1894		0.27 a 0.43
RES. AL DESGASTE POR ROCE				BUENA

Los valores del peso específico y módulo de elasticidad son los utilizados en la modelización digital de este edificio.

4.2.1.2 Forjados

Los forjados son de metacrilato transparente de 120cm de largo por 120cm de ancho y con un espesor de 5 milímetros.

El metacrilato presenta un módulo de poisson alto que le da mayor rigidez a los forjados haciéndolos más parecidos a los pórticos de cortante.



Figura 4.3: PLACA DE METACRILATO

Las propiedades mecánicas del metacrilato utilizado en este modelo se presentan en la tabla 4.2 [W2]:

Tabla 4.2: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL METACRILATO

METACRILATO (Valores tipo a 23°C y 50% de humedad relativa)			
PROPIEDADES MECANICAS	NORMA	UNIDAD	VALORES
Densidad	DIN53479	g/c m ³	1.19
Resistencia al impacto Charpy	ISO 179 1/D	kJ/ m ²	15
Resistencia al impacto con entalladura (Izod)	ISO 180 1/A	kJ/ m ²	1.6
Estiramiento a rotura	DIN53455	%	5.5
Coeficiente de Poisson	-	-	0.45
Resistencia a la flexión	DIN53452	Mpa	115
Probeta standard (80x10x4mm)			
Tensión por compresión	DIN53454	Mpa	110
Tensión de seguridad max. (hasta 40° C)	-	Mpa	5...10
Módulo de elasticidad E (Corto/largo plazo)	DIN 53457	Mpa	3300/3200
Módulo de torsión G en 10 Hz	DIN53445	Mpa	1700
Coeficiente de fricción plástico sobre plástico	-		0.8
Coeficiente de fricción plástico sobre acero	-		0.5
Coeficiente de fricción acero sobre plástico	-		0.45

4.2.1.3 Base

La base vibratoria se realizó con elementos existentes en el laboratorio de dinámica de estructuras que consiste en la unión de dos carriles móviles encima de ellos se colocó una placa metálica donde se colocará la base del edificio. Esta base será empujada por el actuador vibratorio.

Los pilares del edificio se anclaron en la base de manera que represente exactamente una base empotrada con restricción de todos los grados de libertad.

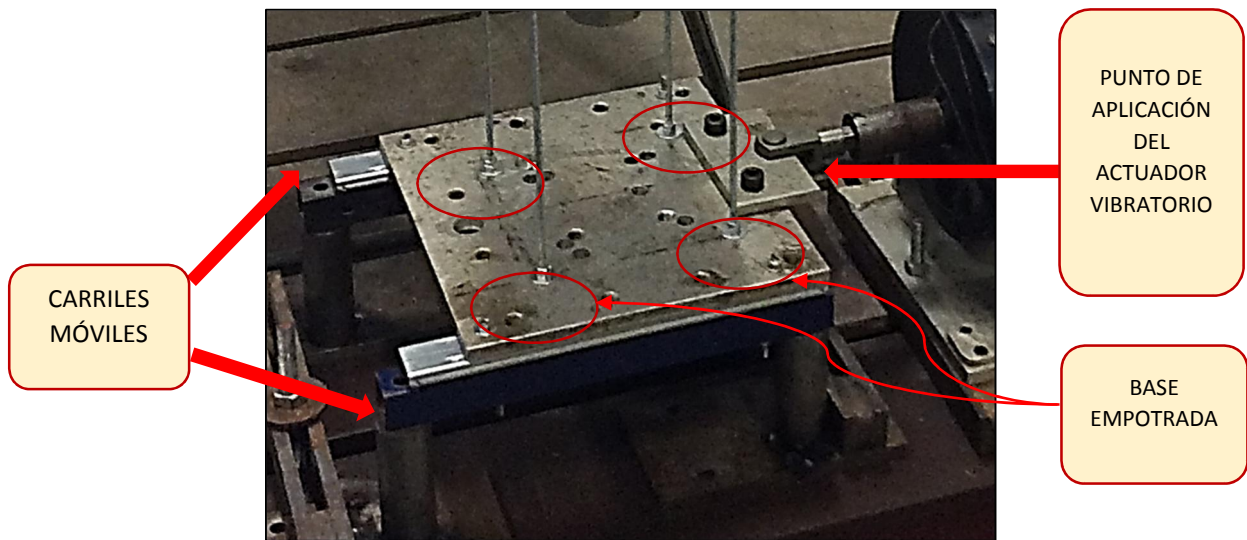


Figura 4.4: BASE VIBRATORIA

4.2.1.4 Ensamblaje del modelo

Los pilares se unieron a los forjados mediante un sistema de tuercas y arandelas de acero de 4 milímetros de diámetro colocadas encima y debajo de cada forjado en cada pilar garantizando así la unión de ambos elementos.

La figura 4.5 muestra un esquema de la unión de ambos elementos:

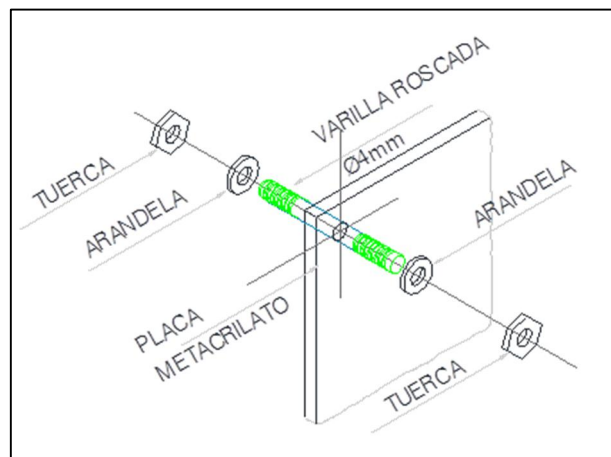


Figura 4.5: UNIÓN FORJADO (PLACA METACRILATO) CON PILARES (VARILLA ROSCADA)

El edificio ensamblado se muestra en la figura 4.6 (a) y en la figura 4.6 (b) se muestra el esquema con las características más importantes para los análisis dinámicos.

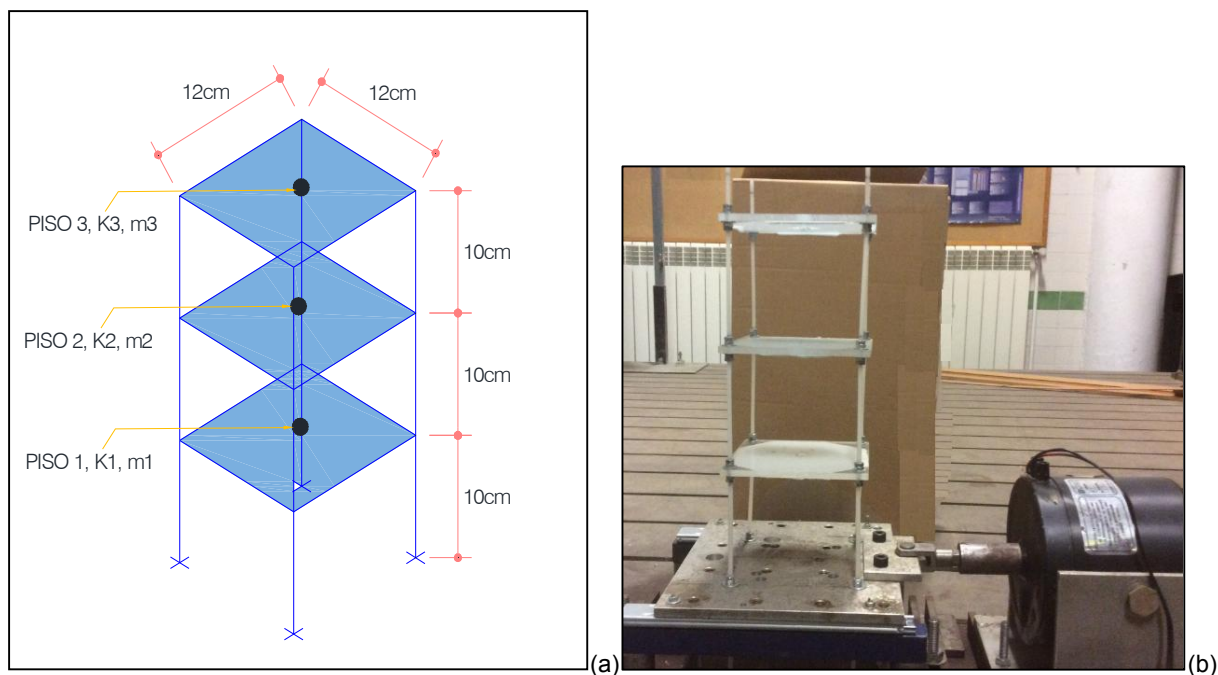


Figura 4.6: EDIFICIO A ESCALA DE ALTURA $H=10\text{cm}$ (a) ESQUEMA 3D (b) ENSAMBLADO

4.2.1.5 Costos de Instrumentación

Los costos de instrumentación son los que se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 4.3: COSTO DE INSTRUMENTACION – MANUFACTURA EDIFICIO $H=10\text{cm}$

ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO (€)
Pilares: Varilla roscada de poliamida por un metro lineal	1 unidad	6,50
Placas de metacrilato 12x12cm (e=5mm)	3 placas	1,50
Tuercas y volandas	1 caja de 100 unidades	3,50

4.2.2 EDIFICIO DE ALTURA H=18cm

4.2.2.1 Pilares

Los pilares en este caso son varillas roscadas de acero con alturas de 18cm entre cada piso y de radio 4 milímetros.

Las propiedades mecánicas del acero son bastante conocidas, y las utilizadas en el modelo numérico son:

- Densidad: $7,85 \times 10^{-9} \text{ Tn/mm}^3$
- Coeficiente de Poisson: 0,3
- Módulo de Elasticidad: $2,1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$



Figura 4.7: VARILLA ROSCADA DE ACERO

4.2.2.2 Forjados

Los forjados son de metacrilato transparente de 120cm de largo por 120cm de ancho y con un espesor de 10 milímetros, para este modelo.

4.2.2.3 Base

La base utilizada es la misma descrita para el edificio de H=10cm de la figura 4.4.

4.2.2.4 Ensamblaje del modelo

El ensamblaje se realizó al igual que el edificio de H=10cm y los esquemas y modelo terminado se muestran en la figura 4.8

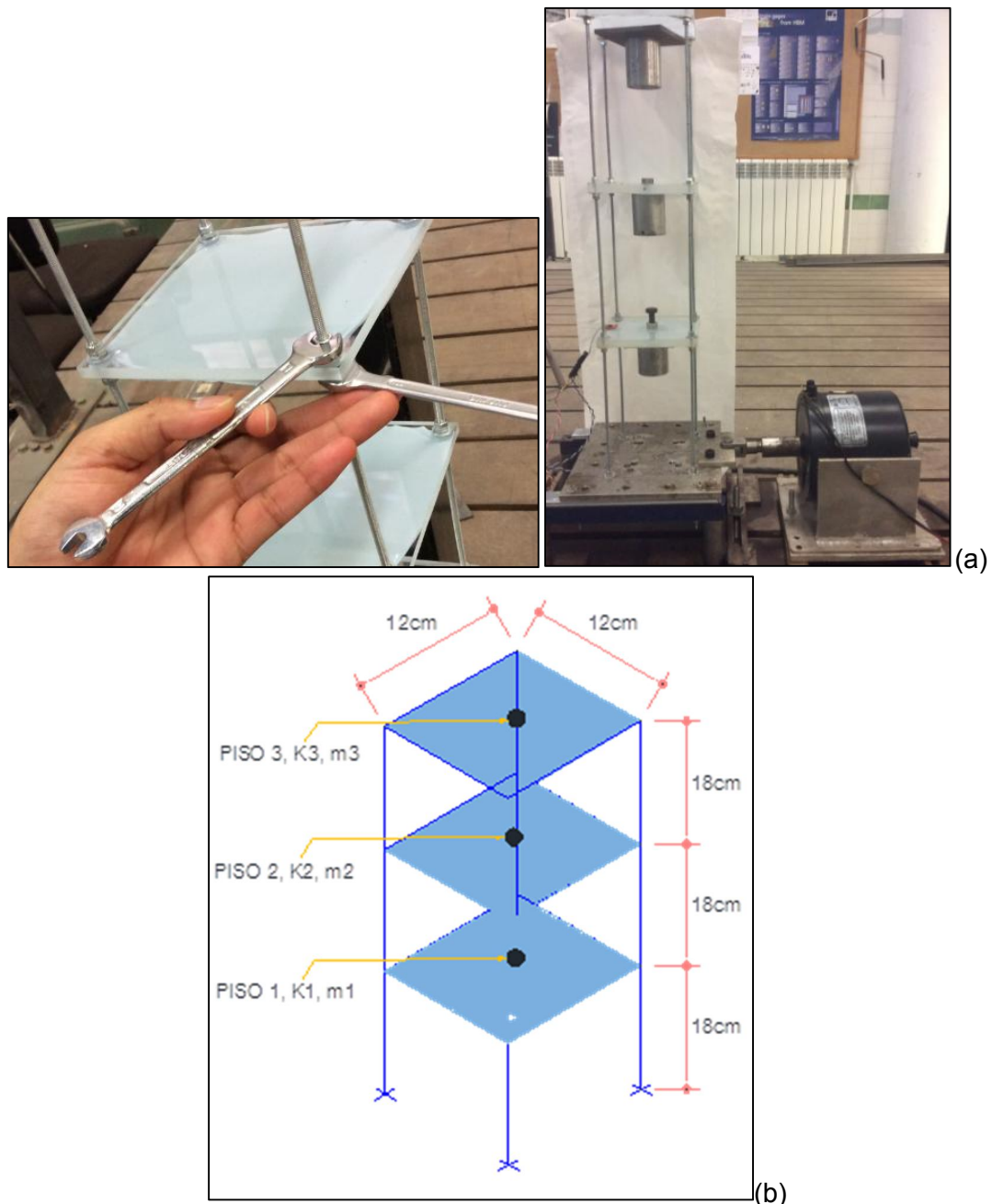


Figura 4.8: EDIFICIO A ESCALA DE ALTURA $H=18\text{CM}$ (a) ENSAMBLADO (b) ESQUEMA 3D

Para el edificio no se comporte como sólido rígido se colocó pesos exactamente en la parte central de cada piso y las características finales del edificio se presentan en la figura siguiente 3.5 que se repite del capítulo III para un mejor entendimiento:

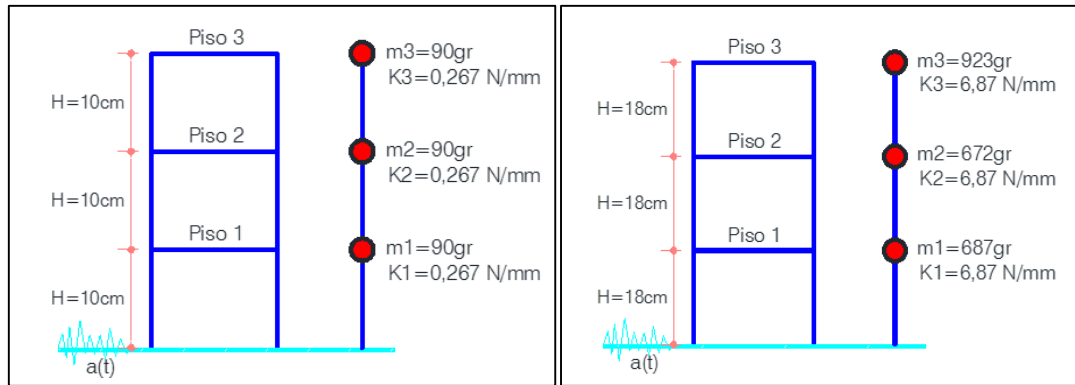


Figura 3.5: DEFINICIÓN DE PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS PARA LOS EDIFICIOS DE H=10cm Y H=18cm

4.2.2.5 Costos de Instrumentación

Los costos en materiales para el ensamblaje de este edificio son:

Tabla 4.4: COSTO DE INSTRUMENTACION – MANUFACTURA EDIFICIO H=18cm

ELEMENTO	CANTIDAD	COSTO (€)
Pilares: Varilla roscada de acero	2 unidad	3,50
Placas de metacrilato 12x12cm (e=10mm)	3 placas	2,50
Tuercas y volandas	1 caja de 100 unidades	3,50

4.3 DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

4.3.1 GENERADOR DE CARGAS

El generador de cargas está formado por un tambor vibratorio, un generador de onda en diferentes frecuencias y un amplificador de ondas generadas.

El tambor vibratorio va conectado directamente con el edificio a ensayar, para que genere movimientos en un solo grado de libertad.



Figura 4.9: TAMBOR VIBRATORIO, UTILIZADO PARA GENERAR CARGAS DINAMICAS

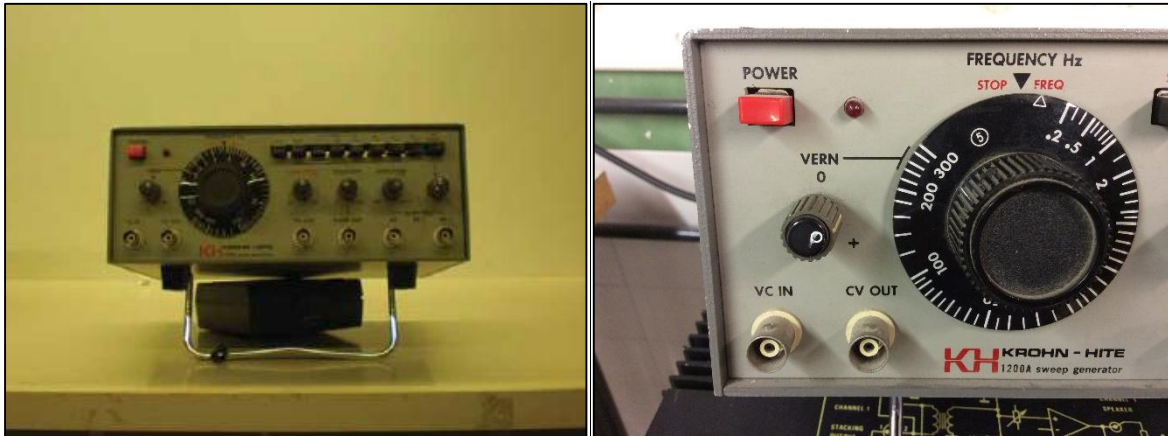


Figura 4.10: GENERADOR DE ONDA

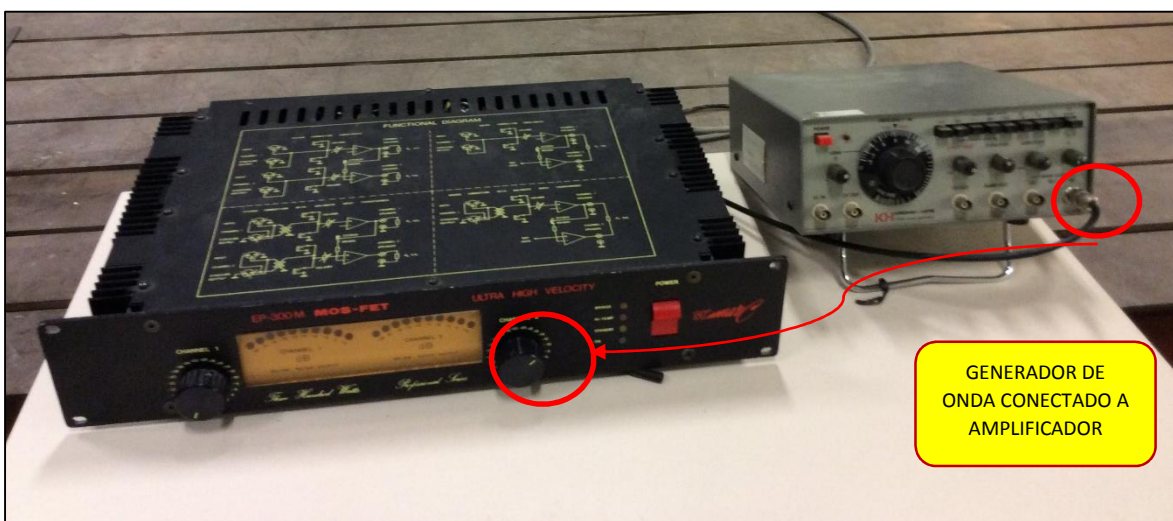


Figura 4.11: AMPLIFICADOR DE ONDAS

En la figura 4.12 se muestra el esquema de conexión del instrumento generador de ondas:



Figura 4.12: ESQUEMA DE CONEXIÓN DEL GENERADOR DE ONDAS

Las señales generadas son las presentadas en el análisis dinámico digital del capítulo anterior.

4.3.2 INSTRUMENTO DE MEDICIÓN

La instrumentación de medición está formada por un acelerómetro conectado a una plataforma de Hardware libre “Arduino” Uno, descrito en el capítulo II. A continuación se detalla el funcionamiento de ambos para la medición de las respuestas de la estructura.

Las respuestas son obtenidas en términos de aceleraciones.

4.3.2.1 Controlador Digital Arduino

El tipo de plataforma digital utilizado es el Arduino Uno por el bajo costo que representa su implementación entre otras ventajas mencionadas en el capítulo II, es así que se prueba su funcionamiento para la obtención de datos de un acelerómetro.

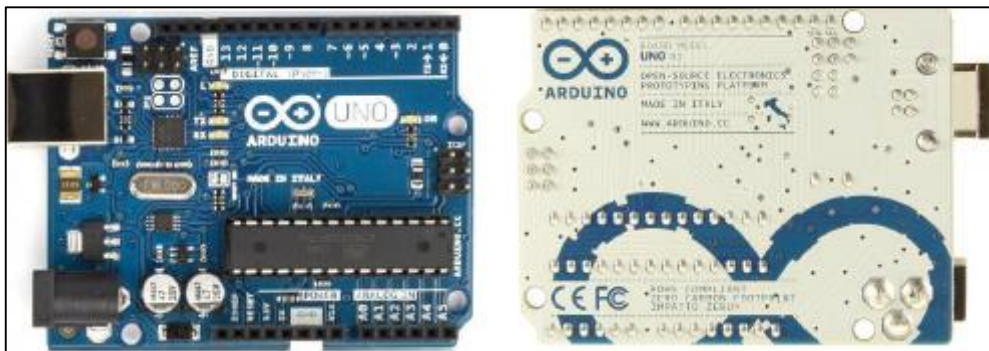


Figura 4.13: HADWARE ARDUINO UNO

Arduino Uno consta de una placa con un microcontrolador Amtel AVR con pines de entrada y salida, 14 pines en total.

Para el presente trabajo se utiliza 1 pin para corriente de 3.3V que va conectado al acelerómetro, 2 pines para corrientes de 5V y tierra (5V, GND, GND), 6 pines para la lectura o recepción de datos (A0-A5 utilizados con `analogRead()`) y un puerto para cable USB que conectado al computador y activando su software con una programación específica se logra recoger los datos captados por el acelerómetro.

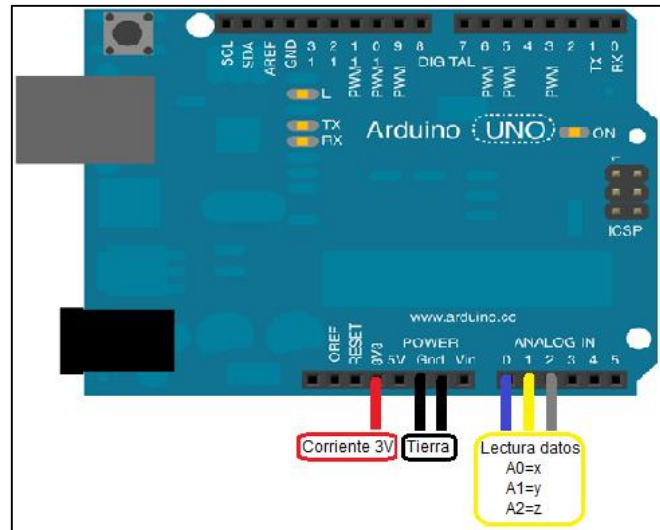


Figura 4.14: PINES UTILIZADOS PARA LECTURA DE DATOS DEL ACELERÓMETRO

El programa utilizado para la lectura de datos del acelerómetro con Arduino Uno es el siguiente:

```

*/
#define I0 A0
#define I1 A1
#define I2 A2

// These constants won't change. They're used to give names
// to the pins used:
const int analogInPin1 = I0; // Analog input pin that the Accelerometer's first pin is attached to
const int analogInPin2 = I1; // Analog input pin that the Accelerometer's second pin is attached to
const int analogInPin3 = I2; // Analog input pin that the Accelerometer's three pin is attached to

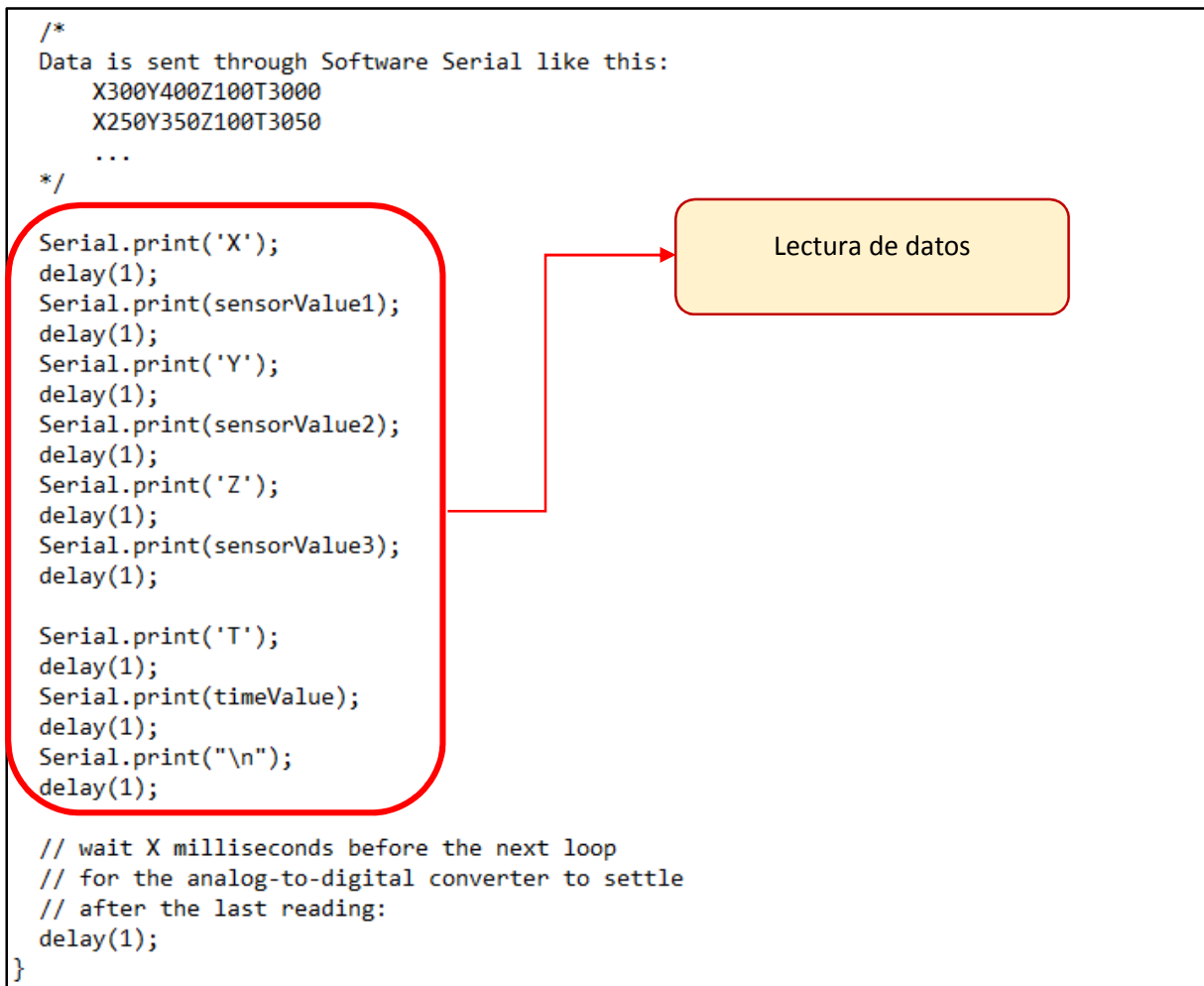
int sensorValue1 = 0; // value read from the Accelerometer's first pin
int sensorValue2 = 0; // value read from the Accelerometer's second pin
int sensorValue3 = 0; // value read from the Accelerometer's three pin
unsigned int timeValue;

void setup() {
  // initialize serial communications at 9600 bps:
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // read the both analog in values:
  sensorValue1 = analogRead(analogInPin1);
  delay(2);
  sensorValue2 = analogRead(analogInPin2);
  delay(2);
  sensorValue3 = analogRead(analogInPin3);
  delay(2);
  timeValue= millis();
  delay(2);
  
```

Definición de cada pin de Arduino

Asignación de cada pin a los sensores del acelerómetro



Los datos leídos por el software de Arduino se presentan de la siguiente manera:

X300Y400Z100T3000

X300 presenta los datos de la coordenada del eje X de la aceleración leída (el valor 300 es variable).

Y400 presenta los datos de la coordenada del eje Y de la aceleración leída (el valor 400 es variable).

Z100 presenta los datos de la coordenada del eje Z de la aceleración leída (el valor 100 es variable).

T3000 presenta los datos del tiempo que corresponde a cada valor de la aceleración leída (el valor 3000 es variable).

Como se observa y como lo indica la programación los datos extraídos son por cada milisegundo, entonces se utiliza una rutina en Matlab para la re-extracción de datos del Software Arduino para poder procesarlos.

La rutina en Matlab se presenta en el Anejo 1 del presente trabajo.

Los datos obtenidos para su proceso tienen un diferencial de tiempo de 0,02 segundos, es decir 50 datos por segundo.

4.3.2.2 Acelerómetro

El acelerómetro utilizado para la medición es del tipo ADXL 335 [w3] que proporciona a Arduino, tres voltajes proporcionales a la aceleración de cada eje X, Y y Z. El dispositivo se alimenta a 3.3 V, por lo que hay que tener cuidado al conectarlo con Arduino de no hacerlo a la salida de 5v, ya que se dañaría el sensor.

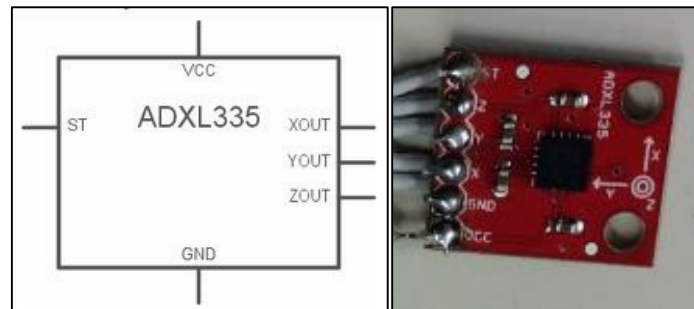


Figura 4.15: ACELERÓMETRO ADXL 335 DE TRES EJES

La conexión del acelerómetro con Arduino se muestra en la figura 4.16

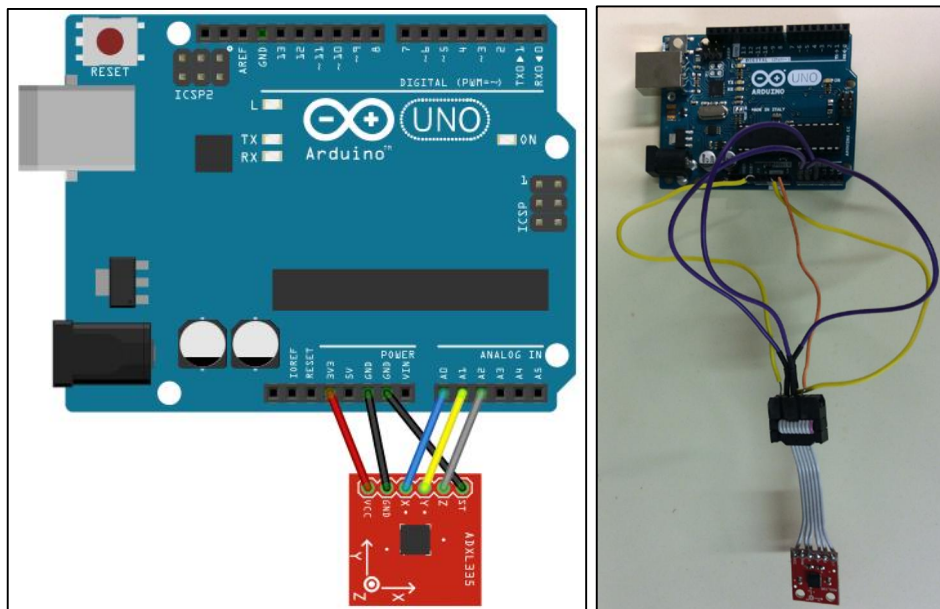


Figura 4.16: CONEXIÓN DEL ACELERÓMETRO CON ARDUINO

Para la validación de los datos obtenidos se realizó la calibración correspondiente con el acelerómetro Spider existente y calibrado en el laboratorio de dinámica de estructuras. Se realizó una medida simultánea de una viga empotrada en el centro de su luz y con el actuador en la zona empotrada. Así los datos que relacionan al acelerómetro Spider y el acelerómetro de Arduino son:

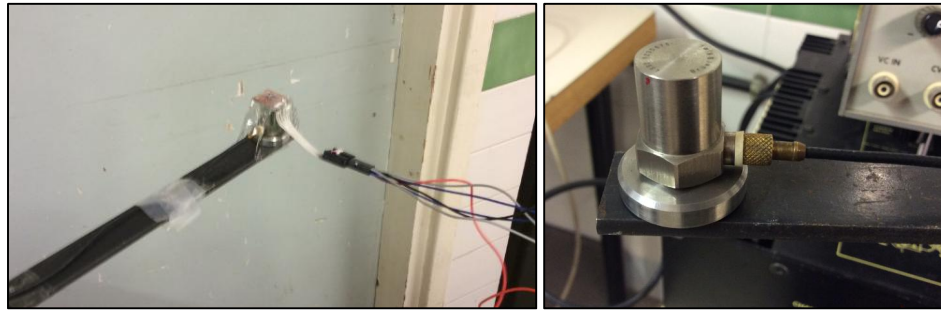


Figura 4.17: CALIBRACION ACCELEROMETRO SPIDER Y ACELERÓMETRO CON ARDUINO

Escala de acelerómetro Spider: 3,27 mV / m*s²

Valor que correlaciona datos entre acelerómetro Spider y ADXL: 2090 (sin unidad), este valor es obtenido específicamente para el acelerómetro utilizado en la toma de datos.

La corrección realizada a los datos obtenidos para convertirlos de voltios a metros sobre segundo al cuadrado es:

$$\text{Módulo} = \frac{1}{0.00327 * 2090} * \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Donde x, y, z, son las coordenadas en voltios de la aceleración medida por el acelerómetro ADXL.

El esquema final del funcionamiento de toma de datos con Arduino y acelerómetro ADLX se muestra en la figura 4.18:

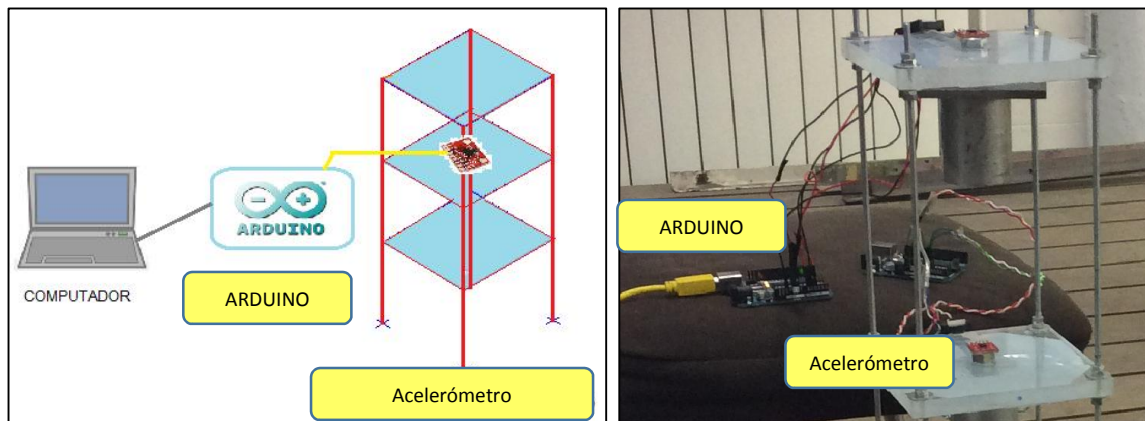


Figura 4.18: ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE ARDUINO Y ACELEROMETRO

4.3.2.3 Costos de Instrumentación

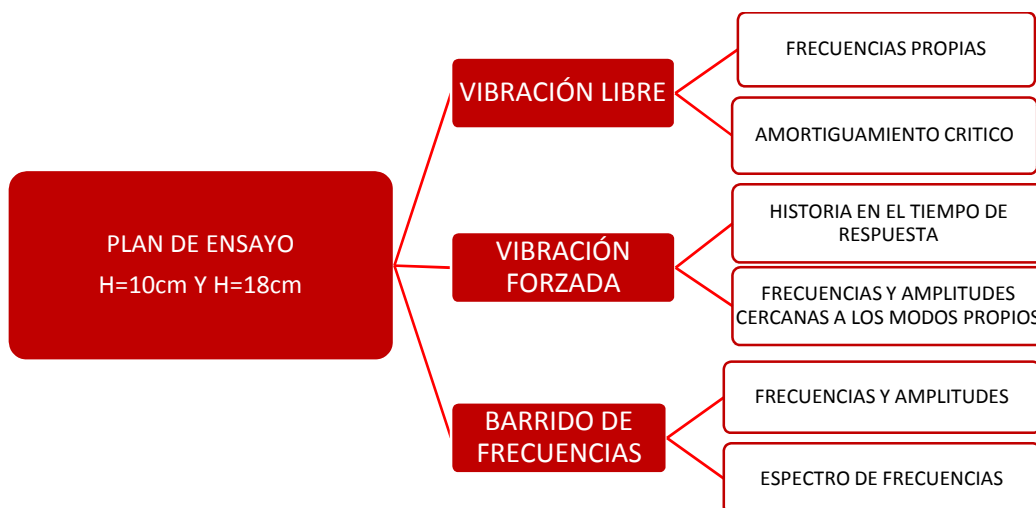
Los costos de Arduino Uno y del acelerómetro ADXL son:

Tabla 4.5: COSTO DE INSTRUMENTACION – MEDICION DE RESPUESTA ESTRUCTURAL

ELEMENTO	COSTO (€)
Arduino Uno	25
Acelerómetro	17

4.4 PLAN DE ENSAYO

El plan del ensayo constituye la planificación de la toma de datos que es de acuerdo a lo elaborado digitalmente para la posterior comparación:



4.4.1 ENSAYO DE VIBRACIÓN LIBRE

El ensayo de vibración libre se realizó aplicando una carga en la parte superior del edificio y soltando para que vibre libremente.

Las siguientes condiciones de contorno fueron aplicadas:

- Edificio empotrado en la base
- Edificio sin conexión con el actuador
- Una única carga aplicada

Los resultados que se obtienen en este ensayo son las frecuencias propias del edificio y el porcentaje de amortiguamiento crítico.

Se realizaron 3 ensayos por cada piso, y los datos obtenidos del primer piso ensayo 1 se muestran en la figura 4.19:

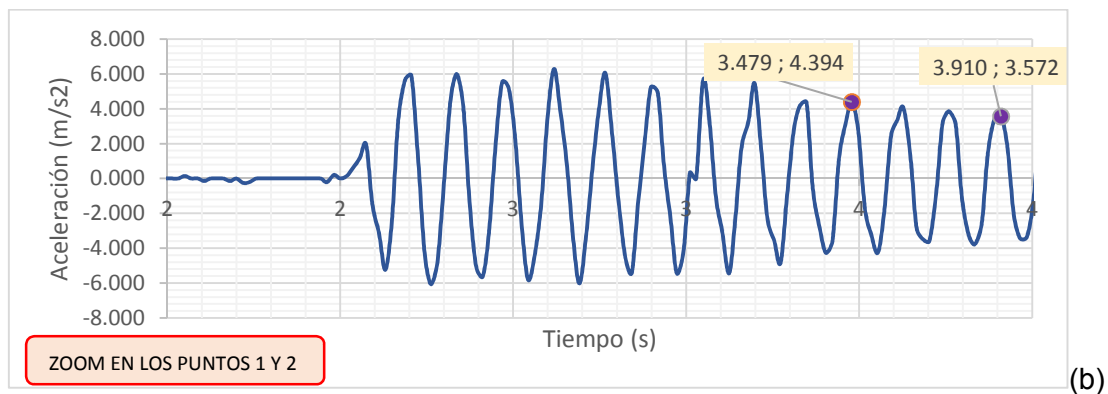
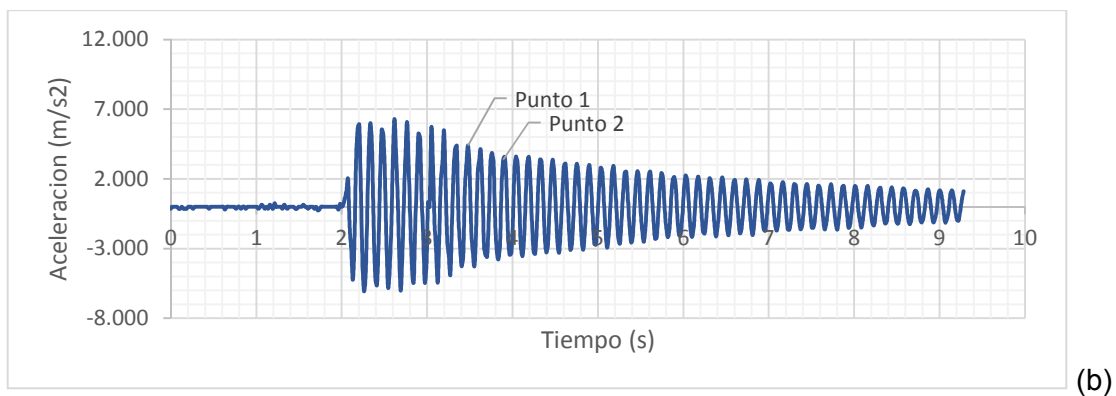
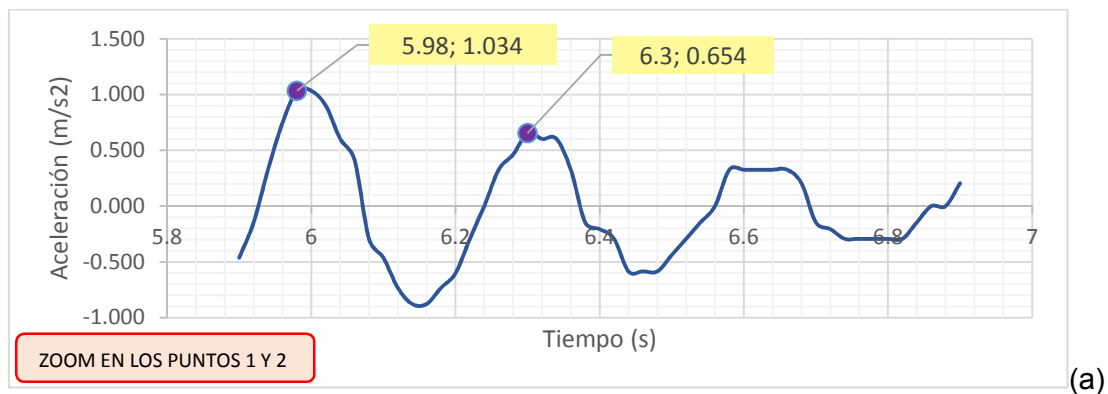
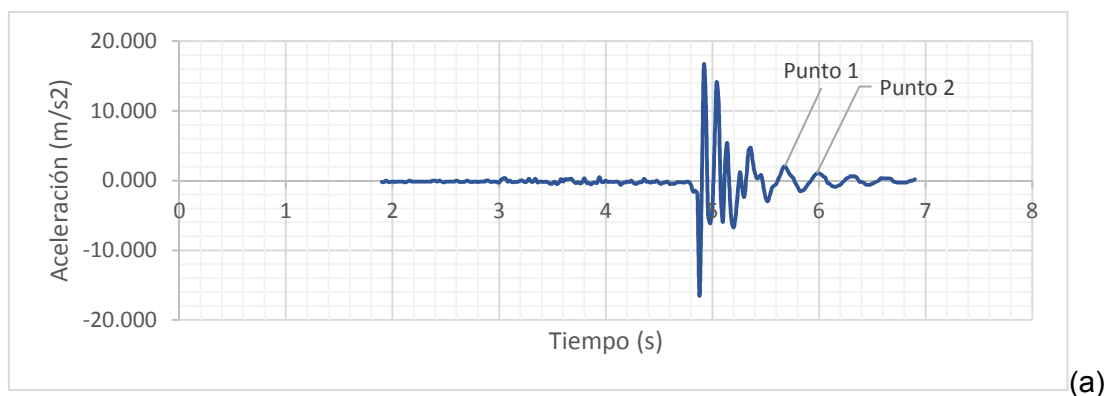


Figura 4.19: DATOS OBTENIDOS DE VIBRACIÓN LIBRE (a) $H=10\text{cm}$, PISO 1 (b) $H=18\text{cm}$, PISO 1

De los puntos pico de amplitud se procede a hallar el valor del amortiguamiento mediante la siguiente fórmula de decremento logarítmico [Paz, 1992] [Chopra, 2014].

$$\nu = \frac{\ln\left(\frac{C_I}{C_{II}}\right)}{\sqrt{4\pi^2 n^2 + \left(\ln\left(\frac{C_I}{C_{II}}\right)\right)^2}} \quad (4.1)$$

Donde:

- ν : porcentaje de amortiguamiento crítico
- C_i y C_{ii} : amplitudes máximas del punto 1 y 2 respectivamente
- n : número de periodos entre amplitudes

Tabla 4.6: CÁLCULO DEL AMORTIGUAMIENTO H=10cm

AMORTIGUAMIENTO H=10cm	
	[Unidades: N, m, s]
PUNTO 1	
tiempo 1(s)	6.0000
aceleracion	1.0340
PUNTO 2	
Tiempo 2 (s)	6.3000
aceleracion	0.6540
Periodo medido	0.3000
Frecuencia medida	3.3333
Frecuencia angular medida	20.9440
n(Número de periodos entre máximos)	1.0000
Amortiguamiento % del crítico	7.2713

Tabla 4.7: CÁLCULO DEL AMORTIGUAMIENTO H=18cm

AMORTIGUAMIENTO H=18cm	
	[Unidades: N, m, s]
PUNTO 3	
tiempo 1(s)	3.4790
aceleracion	4.3940
PUNTO 4	
Tiempo 2 (s)	3.9100
aceleracion	3.5720
Periodo medido	0.1437
Frecuencia medida	6.9606
Frecuencia angular medida	43.7345
n(Número de periodos entre máximos)	3.0000
Amortiguamiento % del crítico	1.0987

Se realiza el mismo proceso para cada piso y para los tres ensayos cuyos resultados son:

Tabla 4.8: PORCENTAJE DE AMORTIGUAMIENTO CRITICO

Amortiguamiento H=10cm				Amortiguamiento H=18cm			
	Piso 1	Piso 2	Piso 3		Piso 1	Piso 2	Piso 3
Ensayo 1	7.28	8.63	12	Ensayo 1	1.10	1.17	1.09
Ensayo 2	8.58	5.26	7.26	Ensayo 2	1.62	1.08	1.00
Ensayo 3	7.82	9.14	7.22	Ensayo 3	1.16	1.09	1.12

El valor adoptado para el porcentaje de amortiguamiento es el promedio de los obtenidos en la tabla 4.8 menos los que se visualizan de color amarillo ya que presentaron una mayor dispersión.

amortiguamiento H=10cm	7,50 %
amortiguamiento H=18cm	1,1 %

Para hallar los valores de las frecuencias propias de manera exacta se utilizó el método espectral y se hace uso del programa en FORTRAN: “Espectro-Newmark” [Dinámica Estructural UPC, 2014] que como su nombre lo indica utiliza el método de Newmark para hallar los máximos valores en distintos periodos y en general para hallar las frecuencias de las ondas. Este programa se utilizó en todos los procesos.

Los máximos valores corresponden a los periodos propios del sistema y su valor inverso a las frecuencias propias del sistema estructural.

Los datos de entrada a “Espectro-Newmark” son las historias de tiempo de la aceleración (tiempo & aceleración) obtenida de la medición de los ensayos, el amortiguamiento obtenido en el punto anterior y si existiera alguna escala de la aceleración.

Los resultados para el piso 3 del ensayo 1 del análisis espectral de periodos son:

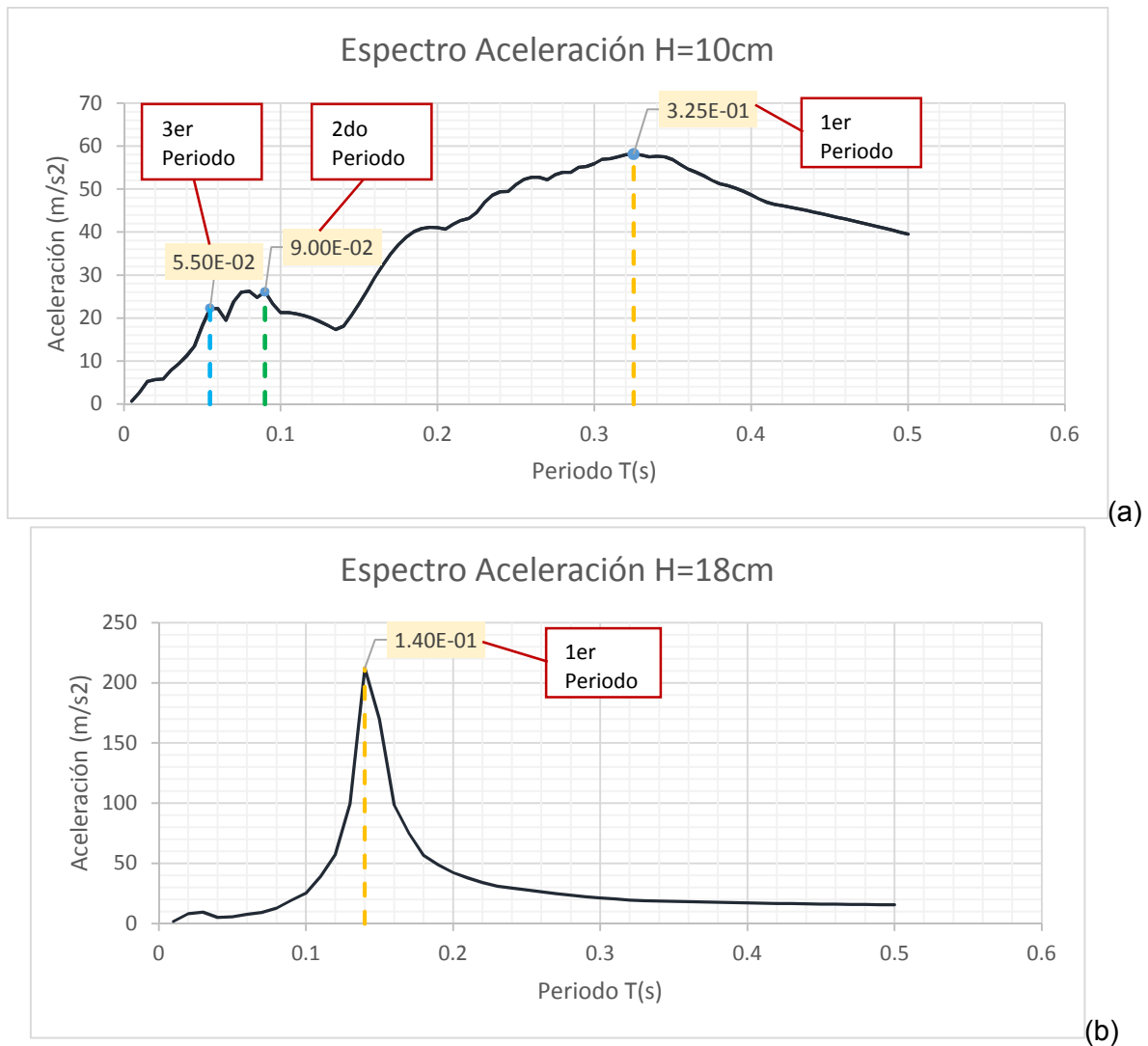


Figura 4.20: ESPECTRO DE ACELERACION PARA VIBRACION LIBRE (a) H=10cm (b) H=18cm

Se observa en la figura 4.20 los valores máximos son los correspondientes los periodos propios del sistema.

Realizando el mismo procedimiento para todos los pisos se encuentra los periodos propios amortiguados en segundos.

Tabla 4.9: PERIODOS PROPIOS DE EDIFICIO A ESCALA H=10cm

PERIODOS Y FRECUENCIAS PROPIOS H=10cm					
	Piso 1	Piso 2	Piso 3	ASUMIDAS T(s)	FRECUENCIA (Hz)
Periodo 1	--	0.308	0.318	0.313	3.20
Periodo 2	0.095	0.075	0.093	0.088	11.43
Periodo 3	0.055	0.05	0.055	0.053	18.75

Tabla 4.10: PERIODOS PROPIOS DE EDIFICIO A ESCALA H=18cm

PERIODOS Y FRECUENCIAS PROPIOS H=18cm					
	Piso 1	Piso 2	Piso 3	ASUMIDAS T(s)	FRECUENCIA (Hz)
Periodo 1	0.14	0.140	0.140	0.140	7.14
Periodo 2	--	--	--	--	
Periodo 3	--	--	--	--	

De las tablas 4.9 y 4.10 se concluye que para el edificio de H=18cm es posible hallar solo un periodo propio, ya que el edificio es 26 veces más rígido que el edificio de H=10cm a pesar de la masa incrementada en 10 veces aproximadamente.

4.4.2 VIBRACIÓN FORZADA

Los ensayos de vibración forzada se realizaron con la aplicación de un movimiento en la base provocado por el actuador.

Las siguientes condiciones de contorno fueron aplicadas:

- Edificio empotrado en la base
- Edificio con movimiento armónico forzado en la base

Los resultados que se obtienen en este ensayo son las frecuencias cercanas a las frecuencias propias obtenidas en vibración libre y las amplitudes correspondientes.

Las respuestas son presentadas en historias de tiempo de aceleración (mm/s^2), velocidad (mm/s) y desplazamiento (mm) para un tiempo total de 20 segundos de los cuales se descarta los primeros datos de 1 segundo por ser inestables o evitar posibles errores en la toma de datos.

Las frecuencias y amplitudes se presentan en la tabla 4.11 para el edificio de altura H=10cm y los valores de la historia de estas respuestas serán comparadas en el siguiente capítulo con la modelización digital específicamente con el procedimiento “Modal Dynamic”

Tabla 4.11: FRECUENCIAS CERCANAS A LAS PROPIAS Y AMPLITUDES H=10cm

Nº Frecuencia	Nº Piso	Frecuencia (Hz)	Amplitud Frecuencia Propia H=10cm		
			Aceleración (mm/s^2)	Velocidad (mm/s)	Desplazamiento (mm)
Primera Frecuencia	Piso 1	3.23	6417.00	316.58	15.62
	Piso 2	3.23	8503.00	419.50	20.70
	Piso 3	3.29	11779.00	573.30	27.90
Segunda Frecuencia	Piso 1	11.11	25460.00	436.04	7.04
	Piso 2	13.33	16306.00	194.70	2.32
	Piso 3	11.11	24182.00	346.42	4.96
Tercera Frecuencia	Piso 1	15.38	10636.00	153.76	2.38
	Piso 2	15.38	15515.00	160.55	1.66
	Piso 3	15.38	12774.00	132.19	1.37

Tabla 4.12: FRECUENCIAS CERCANAS A LAS PROPIAS Y AMPLITUDES H=18cm

Nº Frecuencia	Nº Piso	Frecuencia (Hz)	Amplitud Frecuencia Propia H=18cm		
			Aceleración (mm/s ²)	Velocidad (mm/s)	Desplazamiento (mm)
Primera Frecuencia	Piso 1	6.25	6107	136.13	3.034
	Piso 2	6.25	7014	178.61	4.55
	Piso 3	6.25	10011	254.93	6.49

En la tabla 4.12 se muestra los datos para el edificio de H=18cm, solo se muestra la comprobación de la primer frecuencia ya que en el ensayo de vibración libre solo se pudo obtener dicha frecuencia.

En el barrido de frecuencias se podrá aproximar visualmente la segunda y tercera frecuencia propia del edificio de H=18cm.

4.4.3 BARRIDO DE FRECUENCIAS

Los ensayos para la obtención de un barrido de frecuencias se realizaron con la aplicación de un movimiento en la base provocado por el actuador.

Las siguientes condiciones de contorno fueron aplicadas:

- Edificio empotrado en la base
- Edificio con movimiento armónico forzado en la base

Los resultados que se obtienen en este ensayo son amplitudes para diferentes frecuencias.

La carga aplicada es armónica con amplitudes indicadas en la tabla 3.11 que será repetida a continuación:

Tabla 3.11: FRECUENCIAS DE CARGA APLICADA AL SISTEMA

H=10cm			
Frecuencia (Hz.)	Amplitud (mm/s ²)		
1	6500	H=18cm	
2	6500	Frecuencia (Hz.)	Amplitud (mm/s ²)
3.1	6500	1	3000
3.858	6500	2	3000
5.55	13000	3.57	3000
6.66	13000	5.26	3000
7.14	13000	6.25	3000
8.33	13000	7.6	3000
10.5	13000	8.33	3000
10.943	13000	8.93	3000
11.11	13000	11.11	3000
13.13	13000	12.5	3000
15.86	13000	18.61	3000
18.18	13000	28.06	3000
28.57	13000		

Con estos valores de carga las frecuencias y amplitudes obtenidas son:

Para el edificio de H=10cm piso 1:

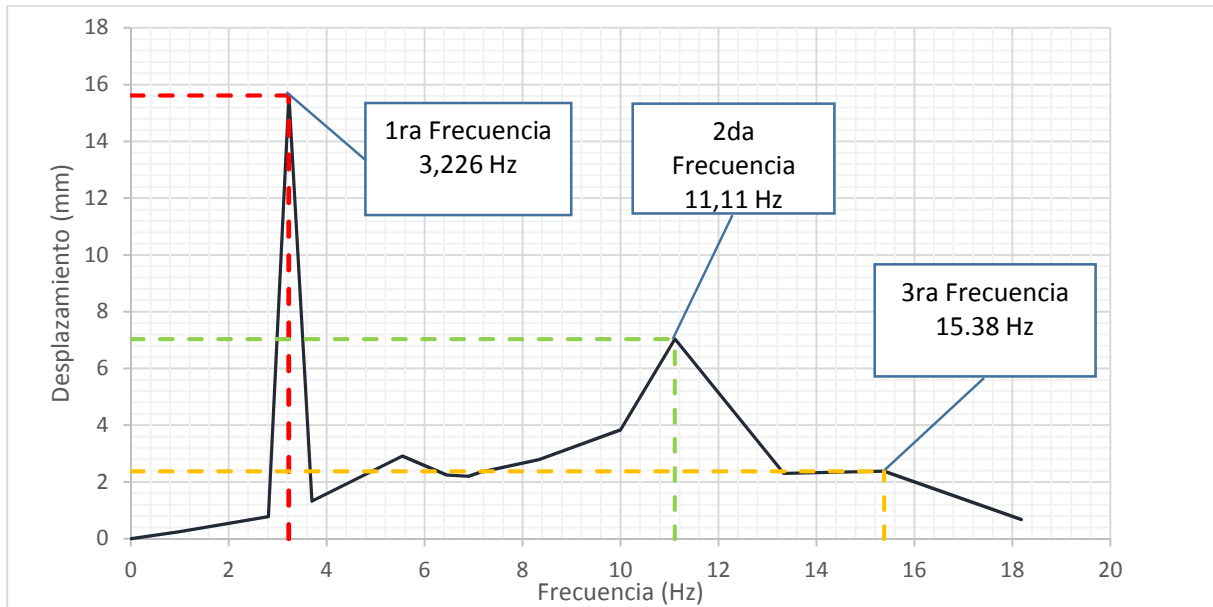


Figura 4.21: BARRIDO DE FRECUENCIAS PISO 1 EDIFICIO H=10cm

Para el edificio de H=10cm piso 2:

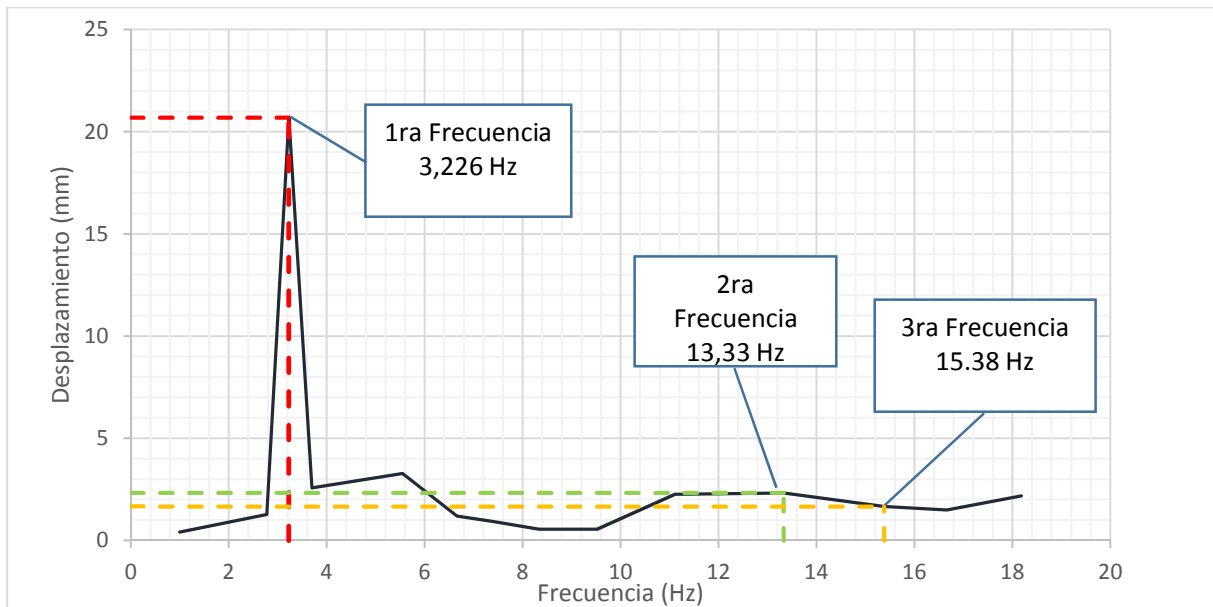


Figura 4.22: BARRIDO DE FRECUENCIAS PISO 2 EDIFICIO H=10cm

Para el edificio de H=10cm piso 3:

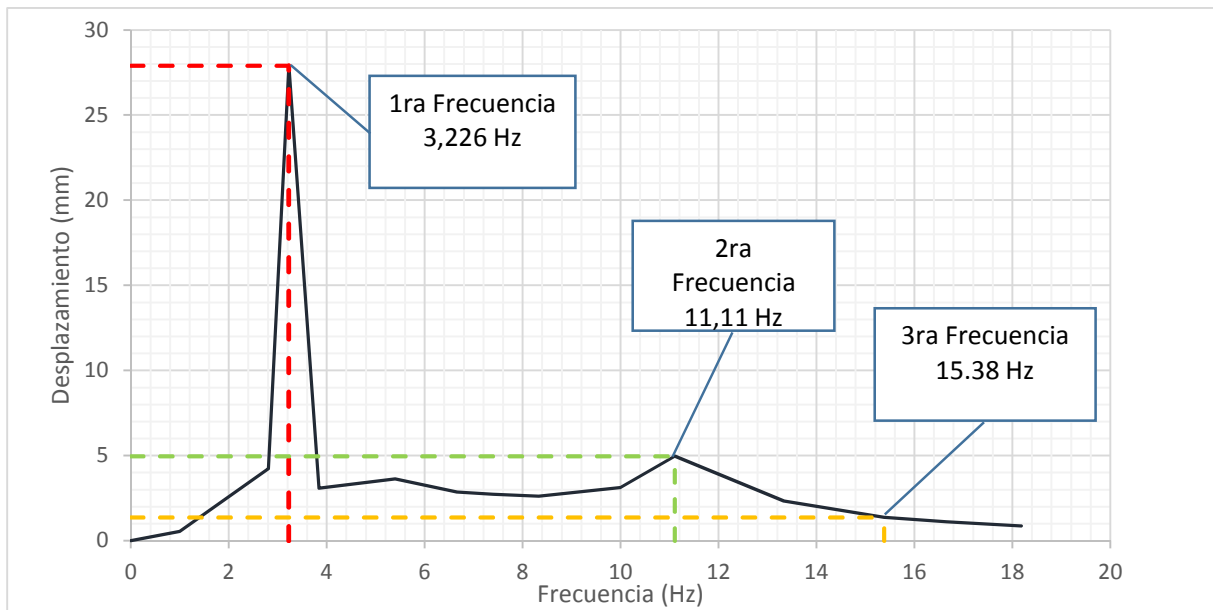


Figura 4.23: BARRIDO DE FRECUENCIAS PISO 3 EDIFICIO H=10cm

Para el edificio de H=18cm se realizó el barrido de frecuencias y se observa que existen otros valores máxima amplitud pero no se pueden precisar si pertenecen a las frecuencias propias del sistema, se concluirá ello en el análisis comparativo de resultados digitales y experimentales.

Para el edificio de H=18cm piso 1:

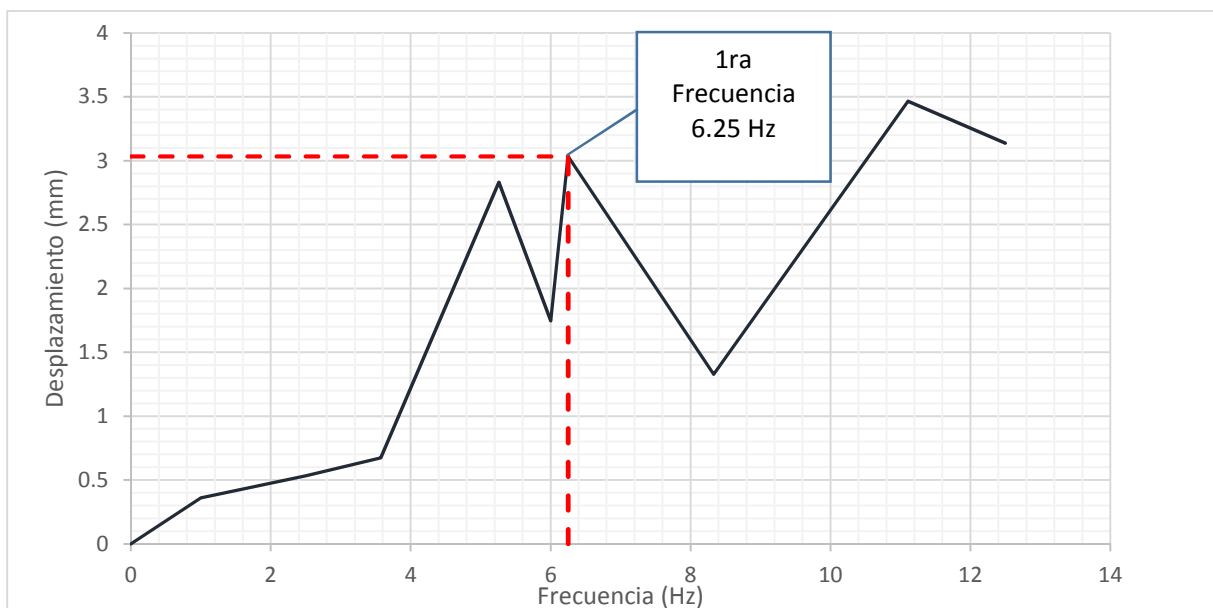


Figura 4.24: BARRIDO DE FRECUENCIAS PISO 1 EDIFICIO H=18cm

Para el edificio de H=18cm piso 2:

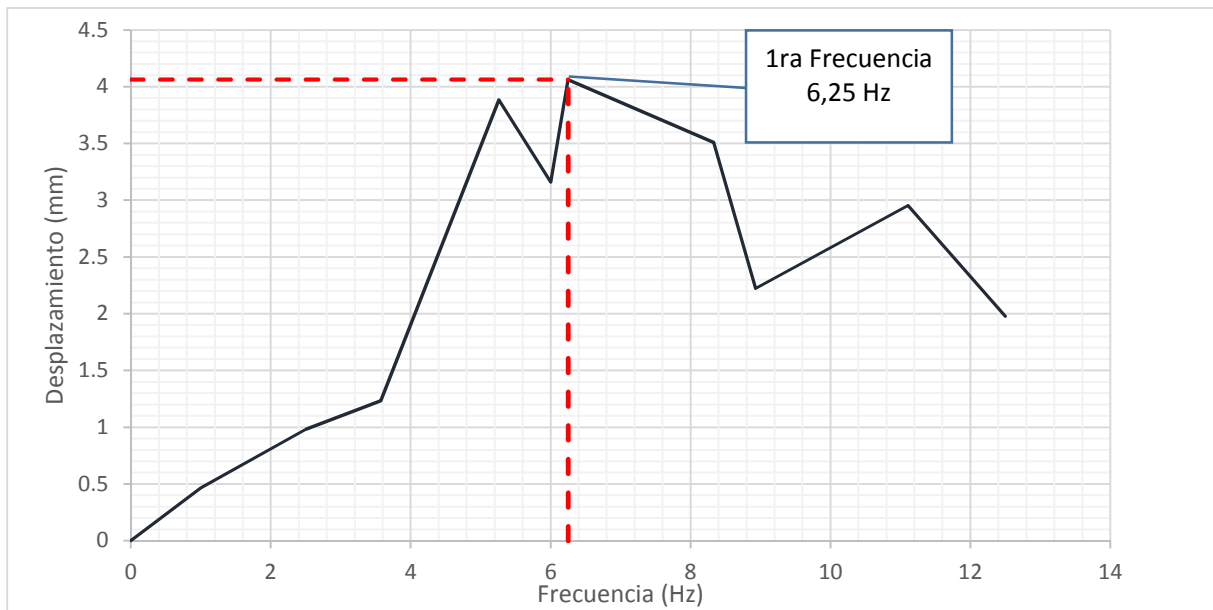


Figura 4.25: BARRIDO DE FRECUENCIAS PISO 2 EDIFICIO H=18cm

Para el edificio de H=18cm piso 3:

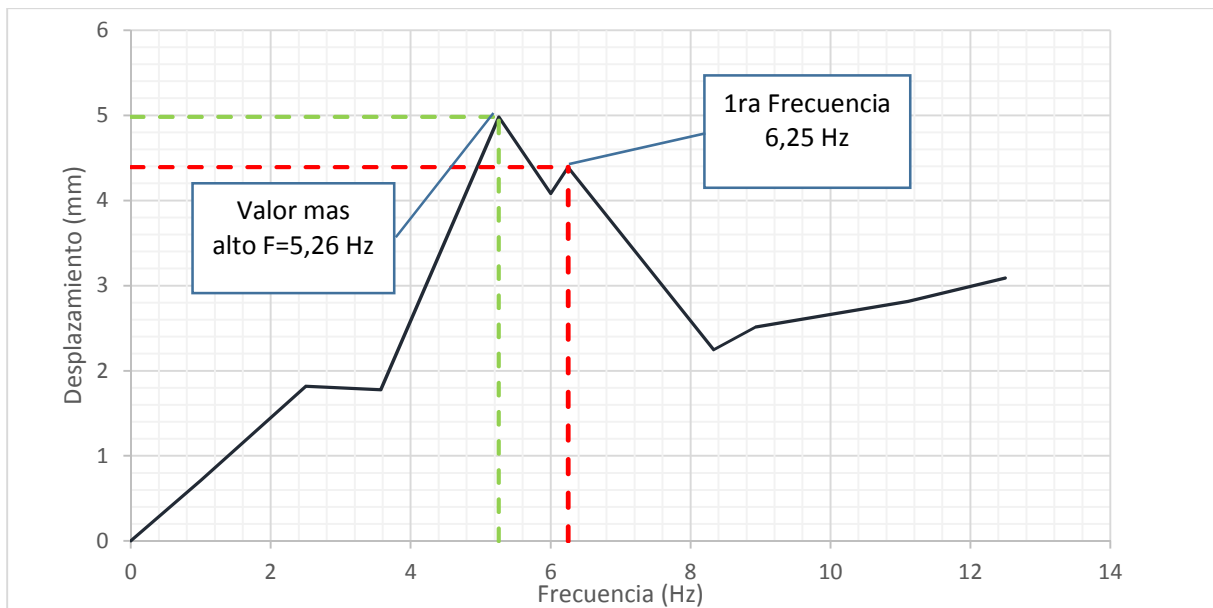


Figura 4.26: BARRIDO DE FRECUENCIAS PISO 3 EDIFICIO H=18cm

Todos los resultados obtenidos serán comparados en el capítulo siguiente con el modelamiento numérico.

CAPÍTULO V

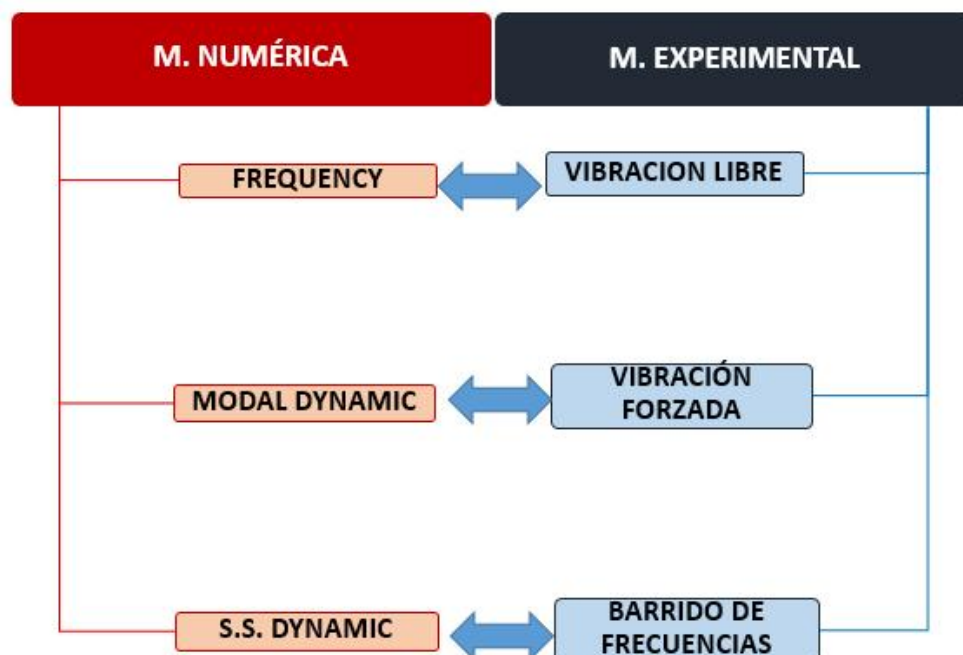
ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos de la modelización digital versus la modelización experimental de los edificios a escala estudiados.

El primer análisis comparativo será para hallar las frecuencias propias del sistema, el segundo análisis se compara las historias en el tiempo de las respuestas de la estructura y el tercer análisis es el barrido de frecuencias para ambos casos.



5.2 ANALISIS FREQUENCY – VIBRACION LIBRE

Se comparan los resultados obtenidos en el procedimiento “Frequency” de la modelización digital que extrae las frecuencias propias no amortiguadas del sistema versus los resultados obtenidos en el ensayo de vibración libre de los edificios a escala afectados por el amortiguamiento para que sean compatibles.

Tabla 5.1: FRECUENCIAS PROPIAS DEL SISTEMA-H=10cm

	PORTICO PLANO H=10cm (Hz)	PORTICO 3D ABAQUS H=10cm (Hz)	Frecuencia Experimental (Hz)	% DE APROXIMACIÓN
Primera frecuencia	3.85	3.89	3.21	82 %
Segunda frecuencia	10.81	10.94	11.46	95 %
Tercera frecuencia	15.62	15.86	18.80	84 %

De la tabla 5.1 se observa que existe una alta aproximación mayor al 80% entre datos digitales y datos experimentales con porcentajes de error menor al 20%.

Tabla 5.2: FRECUENCIAS PROPIAS DEL SISTEMA-H=18cm

	PORTICO PLANO H=18cm (Hz)	PORTICO 3D ABAQUS H=18cm (Hz)	Frecuencia Experimental (Hz)	% DE APROXIMACIÓN
Primera frecuencia	6.51	6.39	7.14	89 %
Segunda frecuencia	18.95	18.61	--	--
Tercera frecuencia	28.49	28.06	--	--

De la tabla 5.2 se observa que la frecuencia fundamental hallada digitalmente se aproxima en 89% a la frecuencia fundamental real. Ello indica que Abaqus tiene buena aproximación a los datos reales.

5.3 MODAL DYNAMIC – VIBRACIÓN FORZADA

En este análisis de resultados de los procedimientos mencionados se presentan las historias en el tiempo de las respuestas de la estructura en términos de aceleraciones, velocidades y desplazamientos para cada piso y para las tres frecuencias halladas en caso del edificio de H=10cm y para la frecuencia fundamental en caso de H=18cm.

5.3.1 COMPARACION DE RESULTADOS PARA EDIFICIO DE H=10cm

Los datos comparados son los del estado estacionario, más no la solución general ya que el movimiento es de larga duración (20 segundos)

PRIMERA FRECUENCIA PROPIA

Piso 1:

En las figuras a se muestran la respuesta de la estructura para la primera frecuencia propia del piso 1:

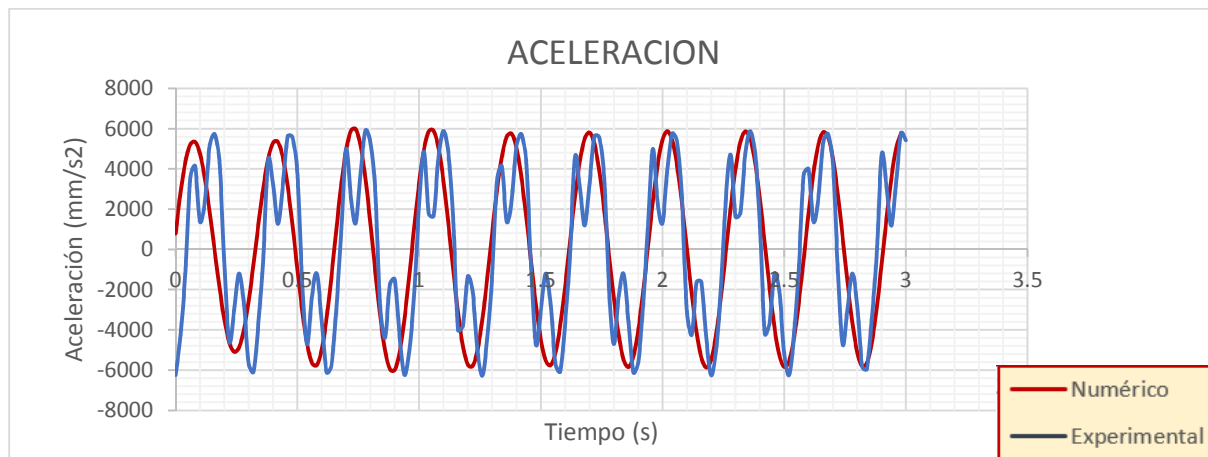


Figura 5.1: ACELERACIÓN MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, PRIMERA FRECUENCIA H=10CM PISO 1

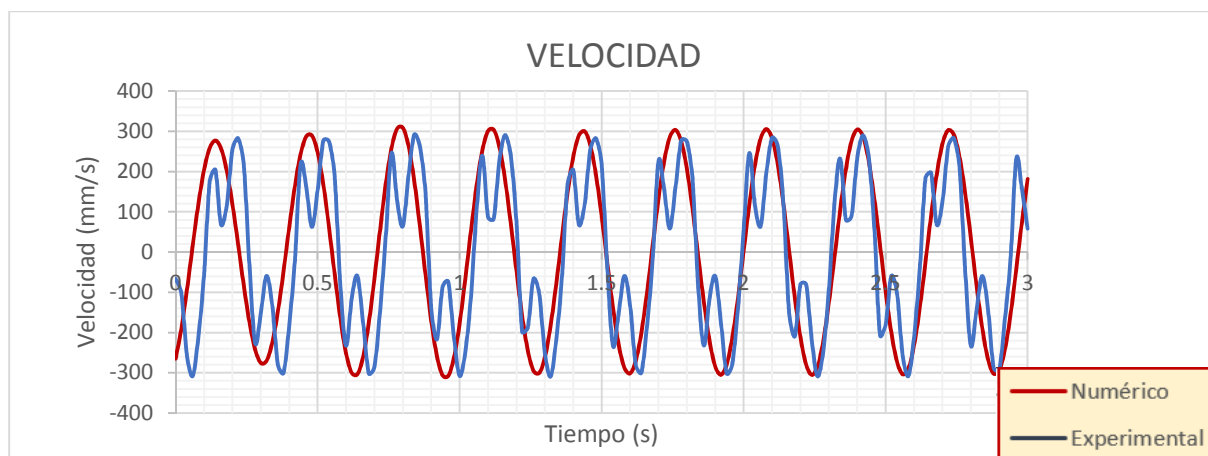


Figura 5.2: VELOCIDAD MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, PRIMERA FRECUENCIA H=10CM PISO 1



Figura 5.3: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, PRIMERA FRECUENCIA H=10CM PISO 1

Piso 2:

En las figuras a se muestran la respuesta de la estructura para la primera frecuencia propia del piso 2:

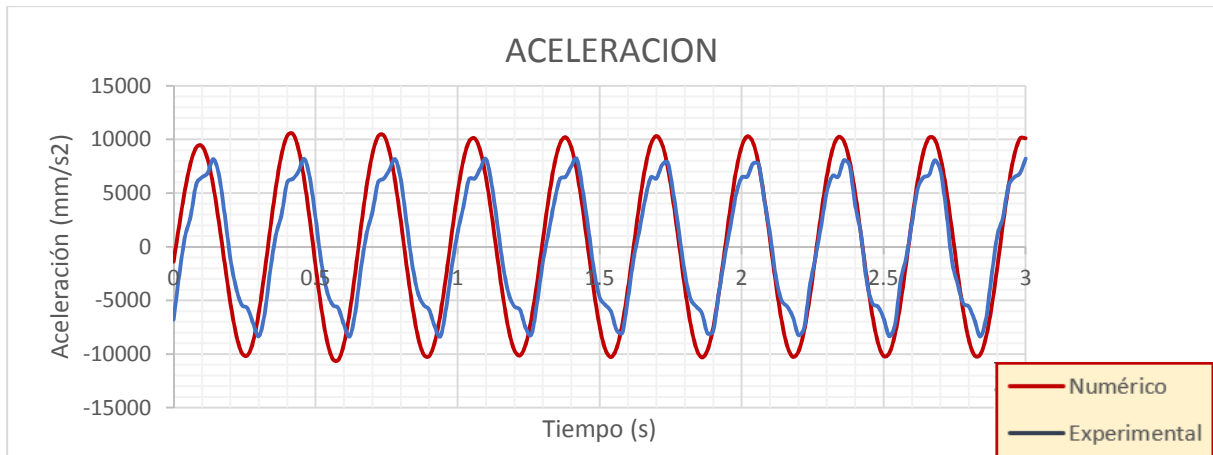


Figura 5.4: ACELERACION MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, PRIMERA FRECUENCIA H=10CM PISO 2

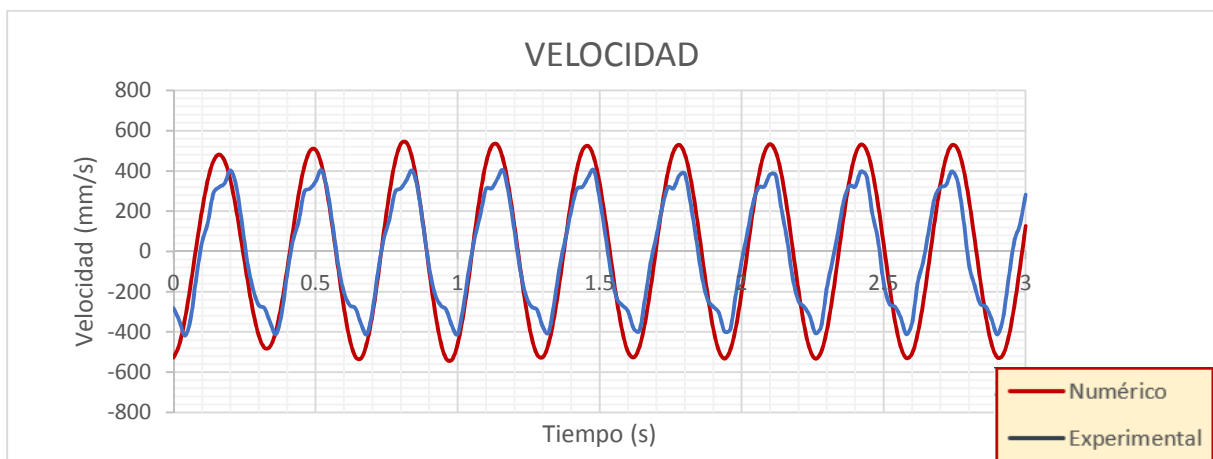


Figura 5.5: VELOCIDAD MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, PRIMERA FRECUENCIA H=10CM PISO 2



Figura 5.6: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, PRIMERA FRECUENCIA H=10CM PISO 2

Piso 3:

En las figuras a se muestran la respuesta de la estructura para la primera frecuencia propia del piso 3:

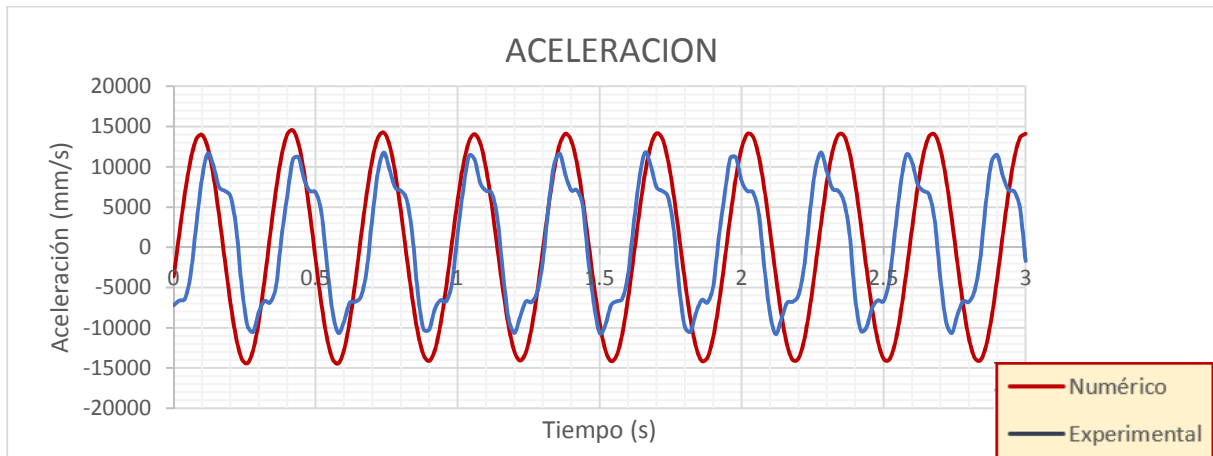


Figura 5.7: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, PRIMERA FRECUENCIA H=10CM PISO 3

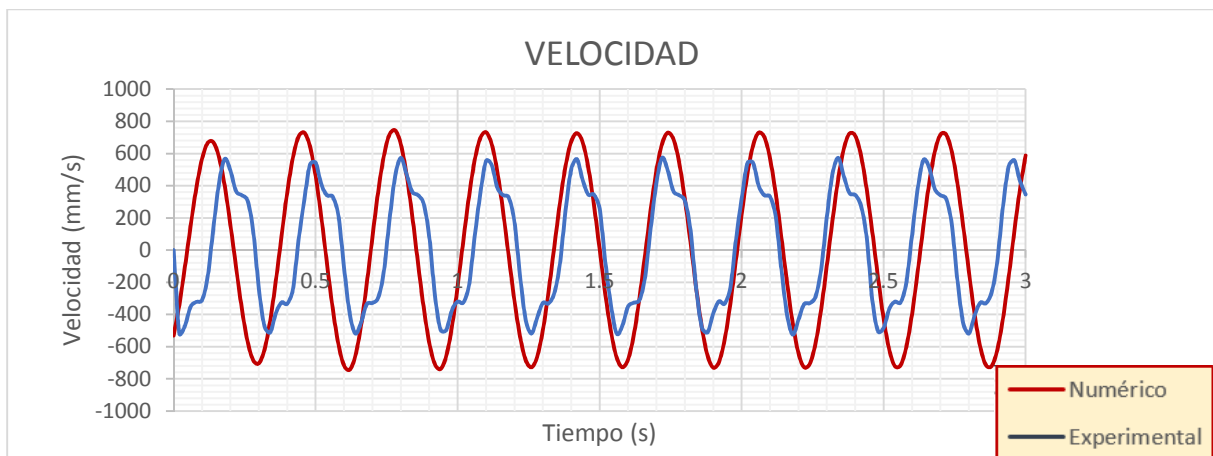


Figura 5.8: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, PRIMERA FRECUENCIA H=10CM PISO 3



Figura 5.9: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, PRIMERA FRECUENCIA H=10CM PISO 3

SEGUNDA FRECUENCIA PROPIA

Piso 1:

En las figuras a se muestran la respuesta de la estructura para la segunda frecuencia propia del piso 1:

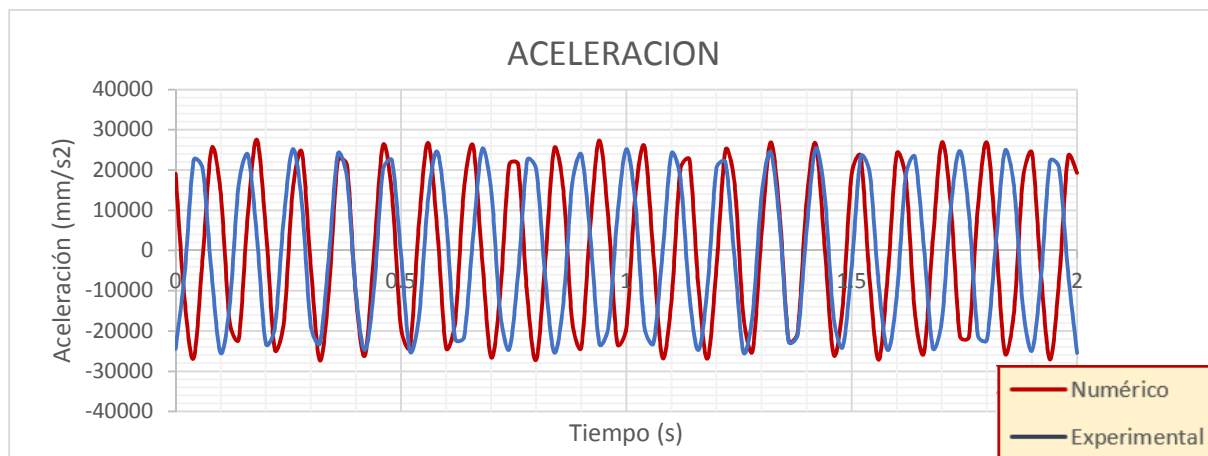


Figura 5.10: ACELERACIÓN MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 2DA FRECUENCIA H=10CM PISO 1

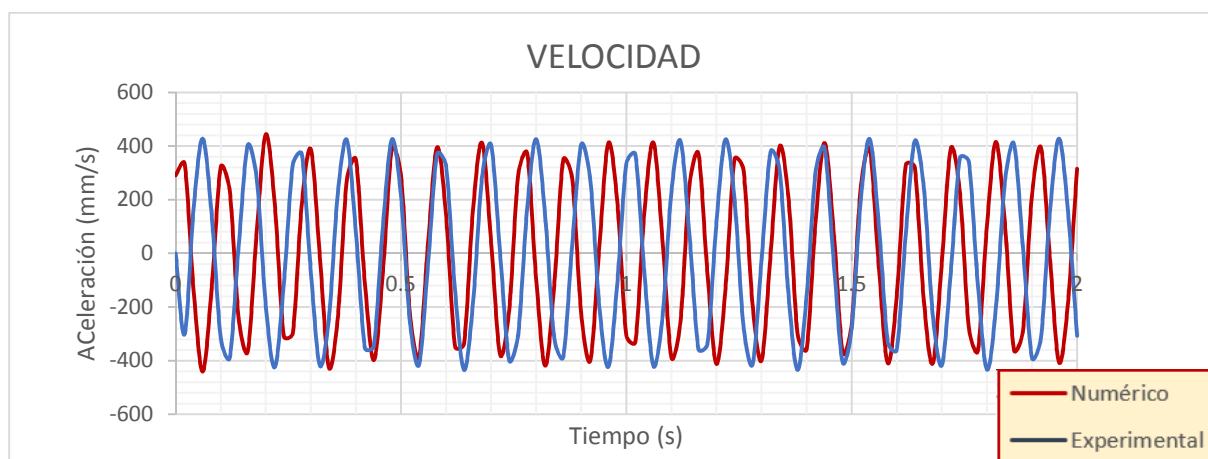


Figura 5.11: VELOCIDAD MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 2DA FRECUENCIA H=10CM PISO 1



Figura 5.12: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 2DA FRECUENCIA H=10CM PISO 1

Piso 2:

En las figuras a se muestran la respuesta de la estructura para la segunda frecuencia propia del piso 2:

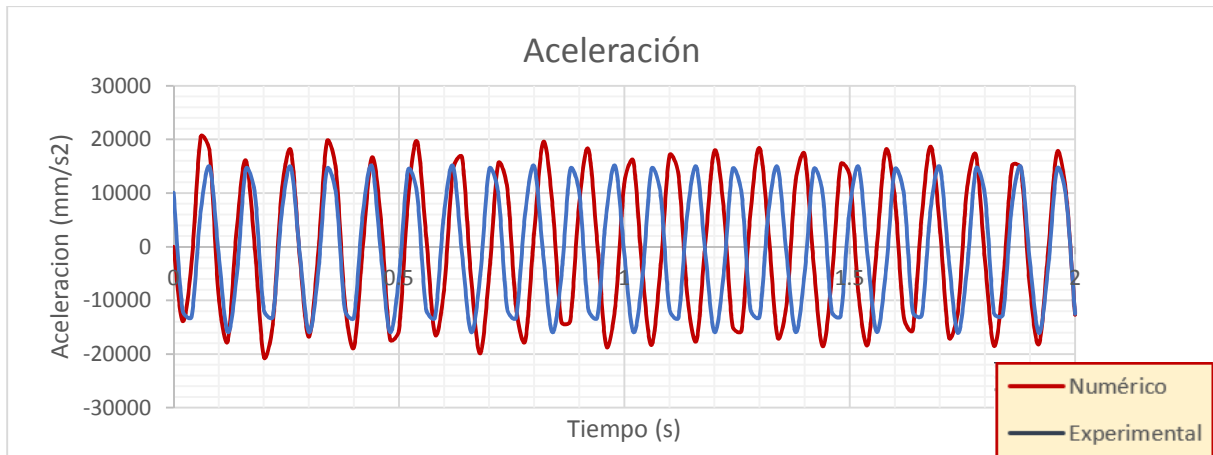


Figura 5.13: ACELERACION MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 2DA FRECUENCIA H=10CM PISO 2

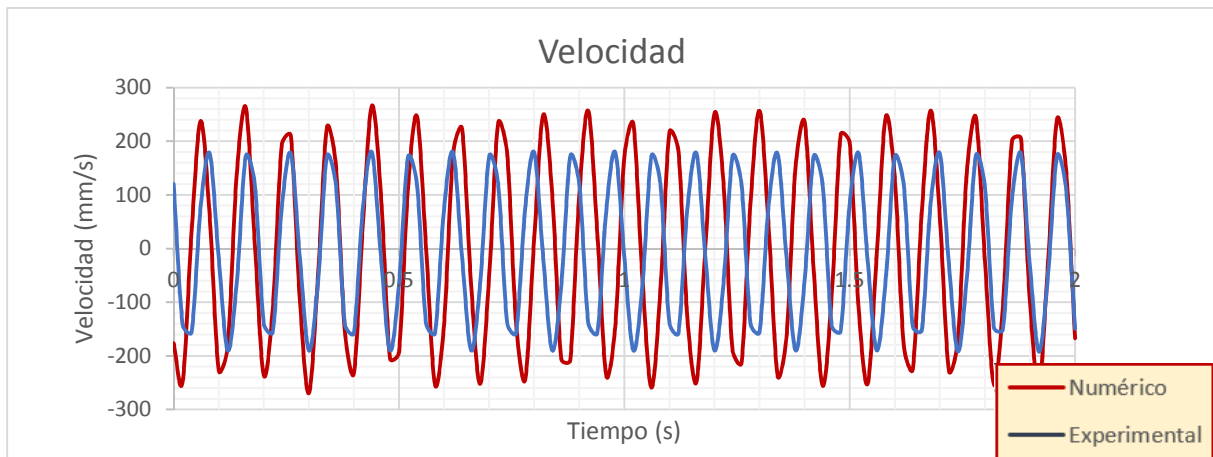


Figura 5.14: VELOCIDAD MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 2DA FRECUENCIA H=10CM PISO 2



Figura 5.15: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 2DA FRECUENCIA H=10CM PISO 2

Piso 3:

En las figuras a se muestran la respuesta de la estructura para la segunda frecuencia propia del piso 3:

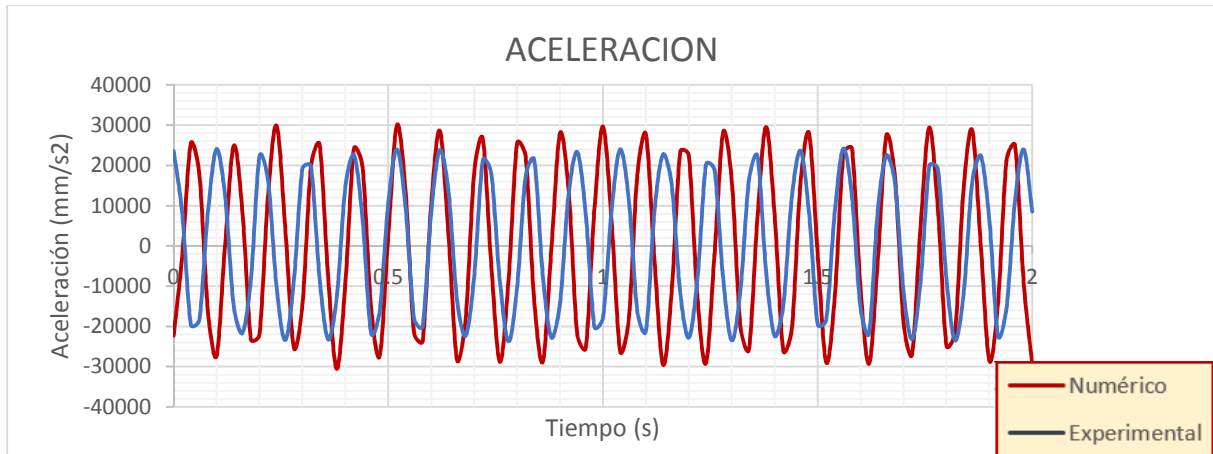


Figura 5.16: ACELERACIÓN MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 2DA FRECUENCIA H=10CM PISO 3

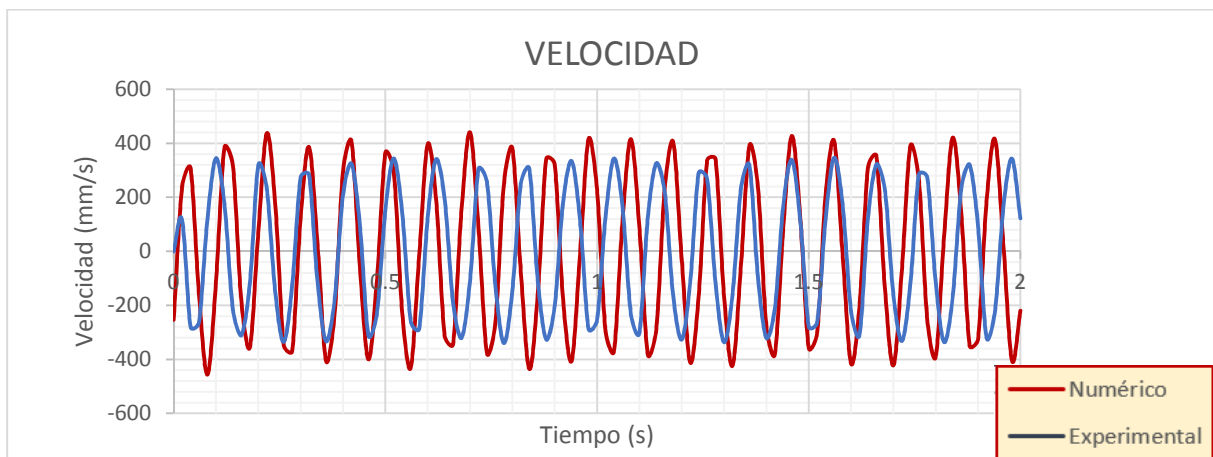


Figura 5.17: VELOCIDAD MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 2DA FRECUENCIA H=10CM PISO 3



Figura 5.18: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 2DA FRECUENCIA H=10CM PISO 3

TERCERA FRECUENCIA PROPIA

Piso 1:

En las figuras a se muestran la respuesta de la estructura para la segunda frecuencia propia del piso 1:

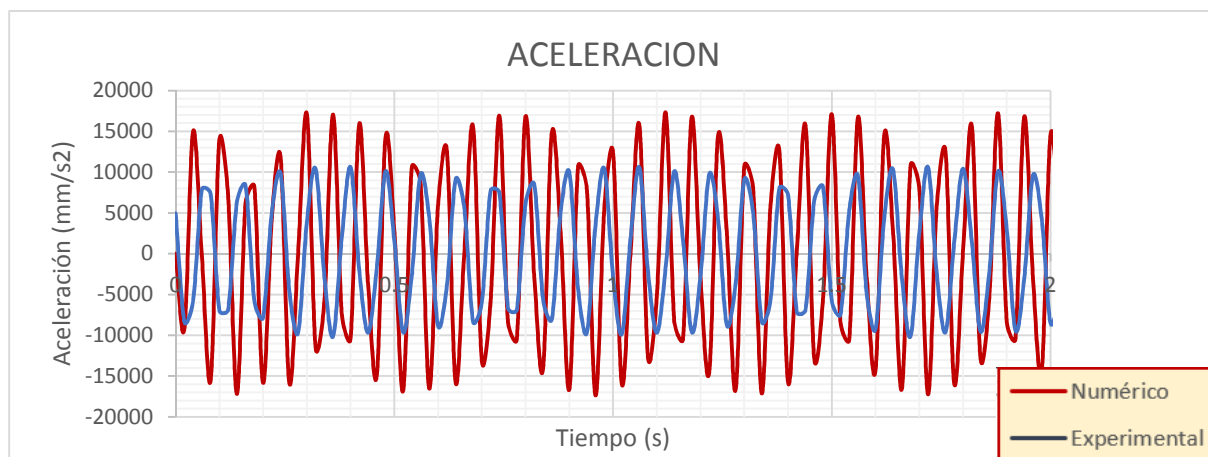


Figura 5.19: ACELERACIÓN MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VOZADA, 3RA FRECUENCIA H=10CM PISO 1

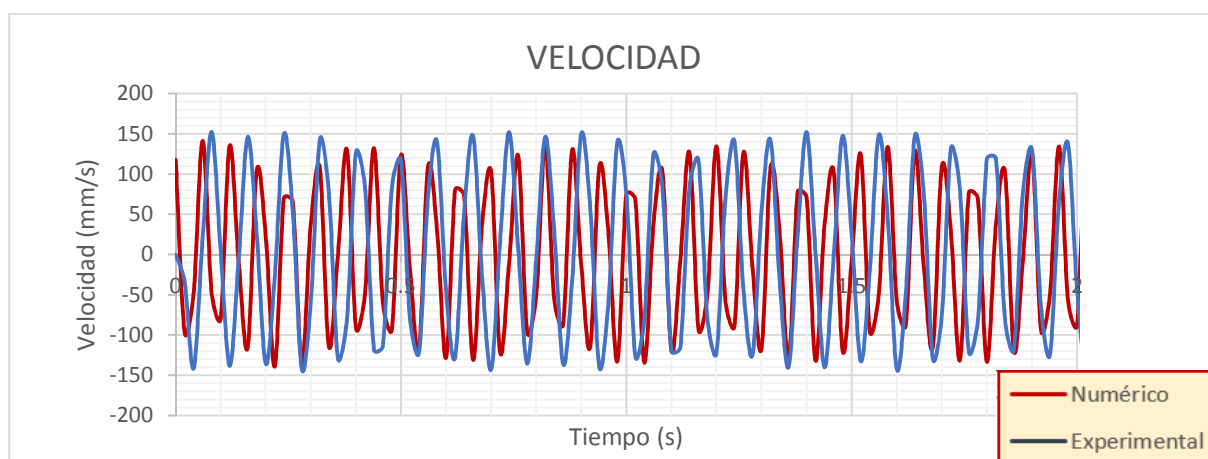


Figura 5.20: VELOCIDAD MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VOZADA, 3RA FRECUENCIA H=10CM PISO 1

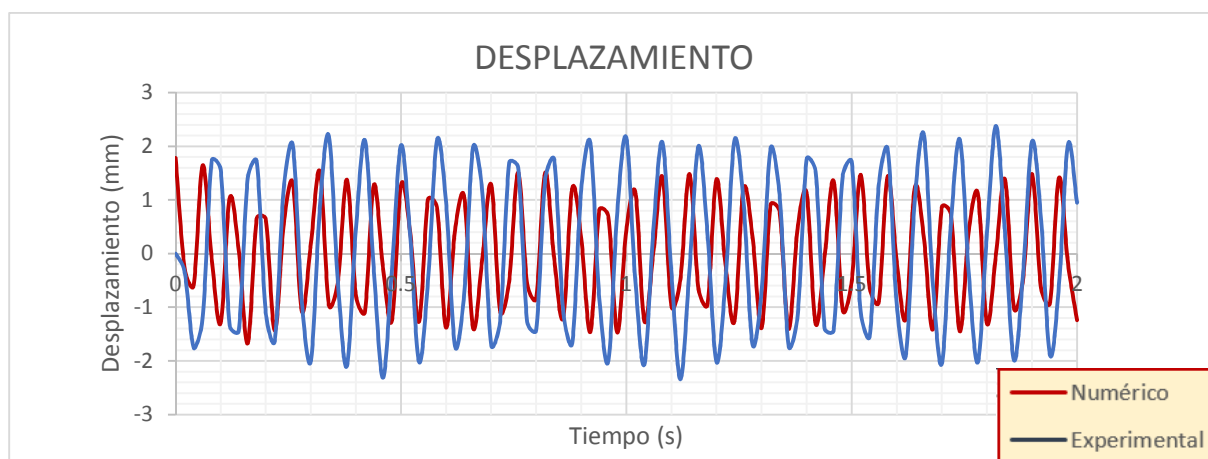


Figura 5.21: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VOZADA, 3RA FRECUENCIA H=10CM PISO 1

Piso 2:

En las figuras a se muestran la respuesta de la estructura para la segunda frecuencia propia del piso 2:

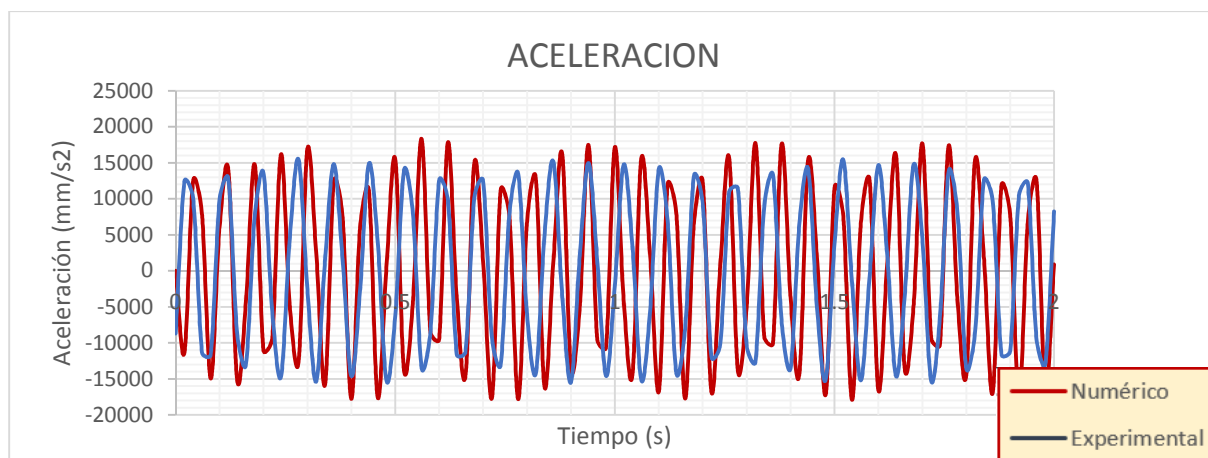


Figura 5.22: ACELERACION MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 3RA FRECUENCIA H=10CM PISO 2

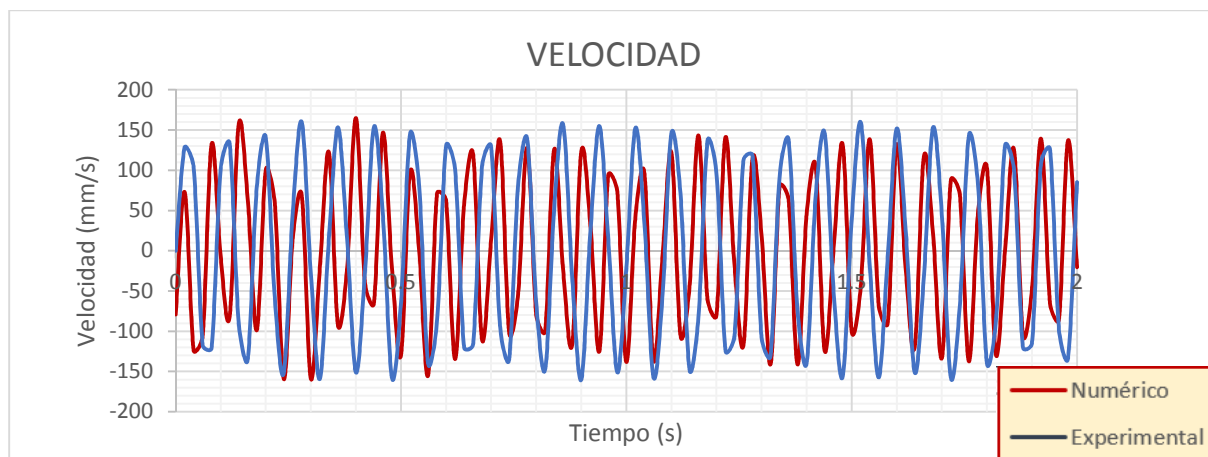


Figura 5.23: VELOCIDAD MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 3RA FRECUENCIA H=10CM PISO 2

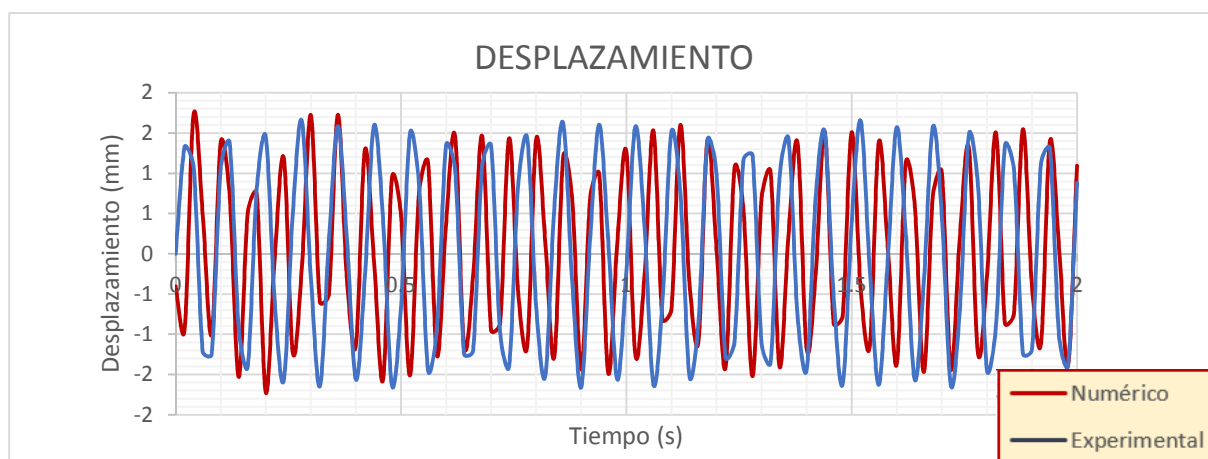


Figura 5.24: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 3RA FRECUENCIA H=10CM PISO 2

Piso 3:

En las figuras a se muestran la respuesta de la estructura para la segunda frecuencia propia del piso 3:

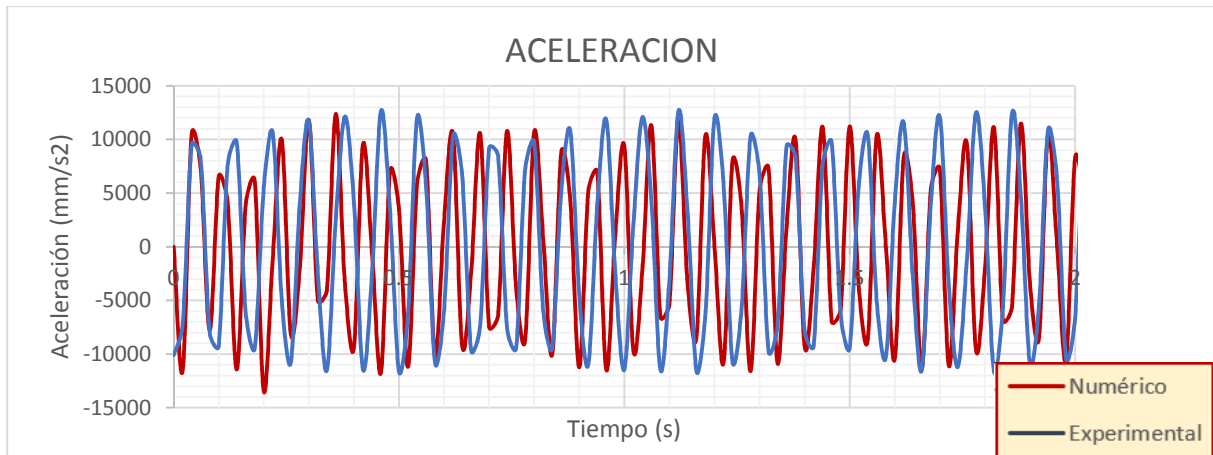


Figura 5.25: ACELERACIÓN MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 3RA FRECUENCIA H=10CM PISO 3

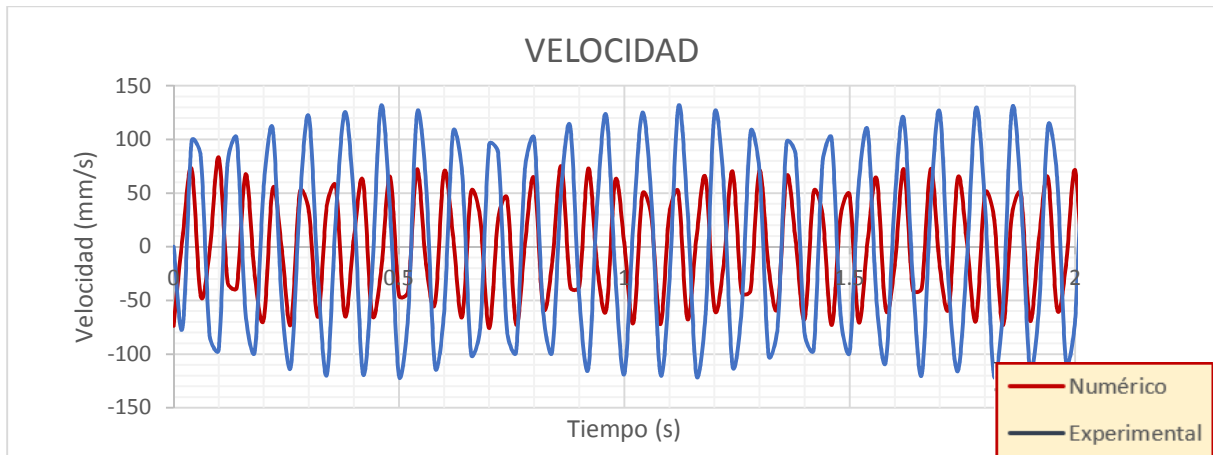


Figura 5.26: VELOCIDAD MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 3RA FRECUENCIA H=10CM PISO 3

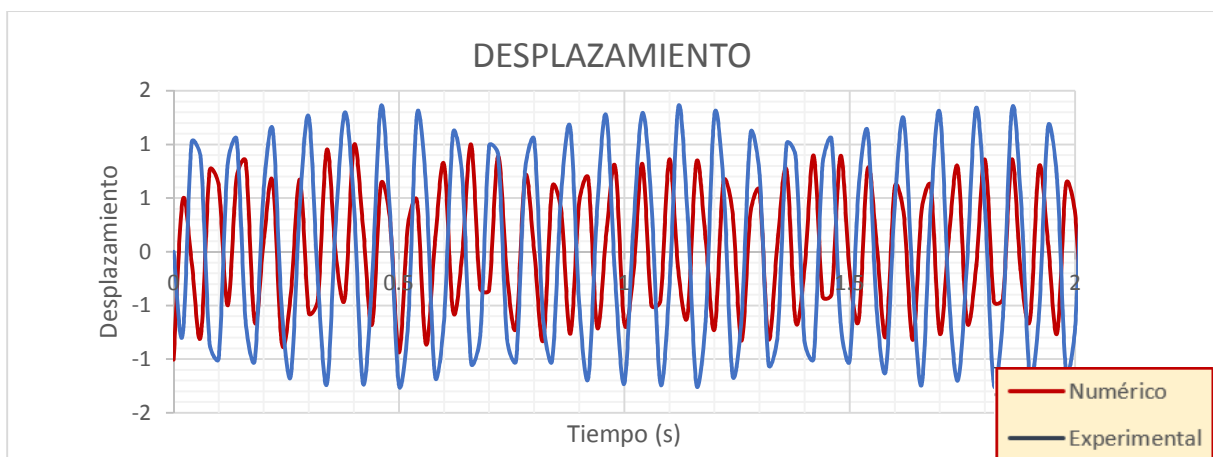


Figura 5.27: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA, 3RA FRECUENCIA H=10CM PISO 3

Para un mejor análisis se presenta las siguientes tablas con los datos resumidos de la comparación de respuestas digitales y experimentales:

Tabla 5.3: COMPARACIÓN DE DATOS MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA EN FRECUENCIAS H=10cm

COMPARACION EN FRECUENCIA H=10cm				
Nº Frecuencia	Nº Piso	Frecuencia Digital (Hz)	Frecuencia Experimental(Hz)	% Aproximación
Primera Frecuencia	Piso 1	3.13	3.23	96.87
	Piso 2	3.13	3.23	96.87
	Piso 3	3.13	3.29	94.98
Segunda Frecuencia	Piso 1	12.50	11.11	88.88
	Piso 2	12.50	13.33	93.77
	Piso 3	12.50	11.11	88.88
Tercera Frecuencia	Piso 1	16.60	15.38	92.65
	Piso 2	16.60	15.38	92.65
	Piso 3	16.60	15.38	92.65

En la tabla 5.3 se observa que la convergencia o aproximación de datos es alta con valores superiores a 88%.

A continuación se presentan la comparación de datos de las respuestas en aceleraciones, velocidades y desplazamientos obtenidas:

Tabla 5.4: COMPARACIÓN DE DATOS MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA EN ACELERACIONES H=10cm

COMPARACION EN ACELERACIONES H=10cm				
Nº Frecuencia	Nº Piso	Aceleración Digital (mm/s ²)	Aceleración Experimental (mm/s ²)	% Aproximación
Primera Frecuencia	Piso 1	5970.00	6417.00	93.03
	Piso 2	10515.70	8503.00	80.86
	Piso 3	14529.50	11779.00	81.07
Segunda Frecuencia	Piso 1	27531.50	25460.00	92.48
	Piso 2	19623.30	16306.00	83.10
	Piso 3	29994.20	24182.00	80.62
Tercera Frecuencia	Piso 1	17334.80	10636.00	61.36
	Piso 2	18312.60	15515.00	84.72
	Piso 3	12362.70	12774.00	96.78

Tabla 5.5: COMPARACIÓN DE DATOS MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA EN VELOCIDADES H=10cm

COMPARACION EN VELOCIDADES H=10cm				
Nº Frecuencia	Nº Piso	Velocidad Digital (mm/s)	Velocidad Experimental (mm/s)	% Aproximación
Primera Frecuencia	Piso 1	308.90	316.58	97.57
	Piso 2	540.70	419.50	77.58
	Piso 3	744.35	573.30	77.02
Segunda Frecuencia	Piso 1	442.87	436.04	98.46
	Piso 2	312.98	194.70	62.21
	Piso 3	463.91	346.42	74.67
Tercera Frecuencia	Piso 1	168.88	153.76	91.05
	Piso 2	164.90	160.55	97.36
	Piso 3	123.28	132.19	93.26

Tabla 5.6: COMPARACIÓN DE DATOS MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA EN DESPLAZAMIENTOS H=10cm

COMPARACION EN DESPLAZAMIENTOS H=10cm				
Nº Frecuencia	Nº Piso	Desplazamiento Digital (mm)	Desplazamiento Experimental (mm)	% Aproximación
Primera Frecuencia	Piso 1	15.80	15.62	98.86
	Piso 2	27.71	20.70	74.71
	Piso 3	37.66	27.90	74.09
Segunda Frecuencia	Piso 1	7.64	7.04	92.12
	Piso 2	3.98	2.32	58.29
	Piso 3	6.74	4.96	73.64
Tercera Frecuencia	Piso 1	1.53	2.38	64.29
	Piso 2	1.62	1.66	97.59
	Piso 3	0.99	1.37	72.26

Como se observa los datos se aproximan con valores superiores al 74% en caso de la primera frecuencia; en caso de la segunda frecuencia los datos divergen en el piso 2 específicamente pero no baja del 50%; y para la tercera frecuencia los datos son variables en el piso 1 pero al igual que en el caso anterior no inferiores al 50%.

5.3.2 COMPARACION DE RESULTADOS PARA EDIFICIO DE H=18cm

Para el caso del Edificio de H=18cm se realizó la comparación para la primera frecuencia propia encontrada en el ensayo de vibración libre, con los siguientes resultados:

Piso 1:

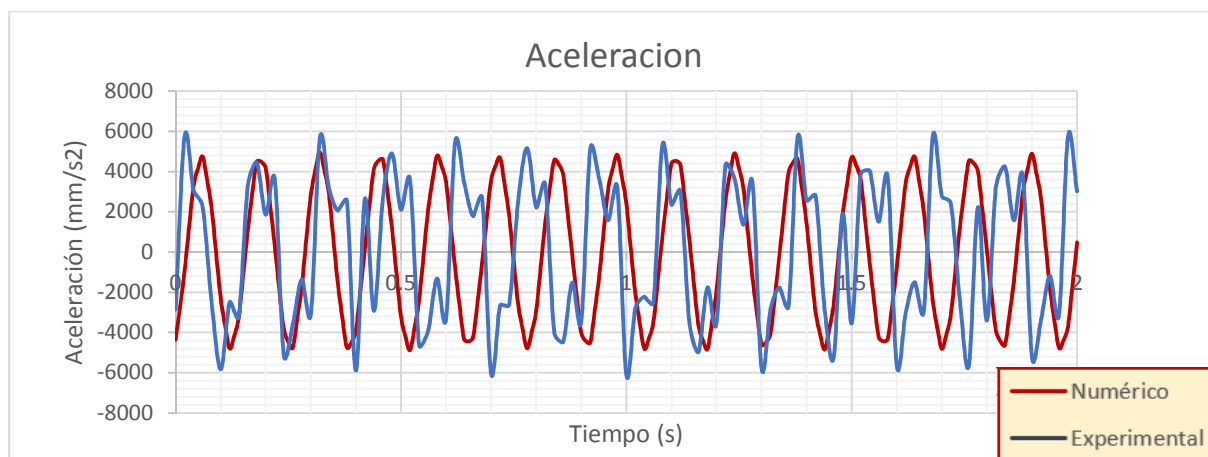


Figura 5.28: ACELERACIÓN MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, 1RA FRECUENCIA H=18CM PISO 1

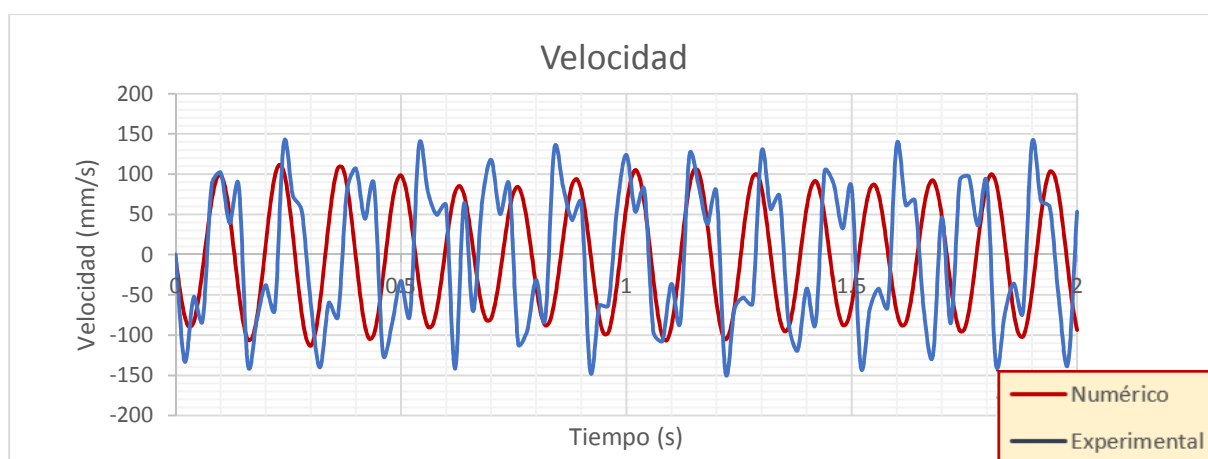


Figura 5.29: VELOCIDAD MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, 1RA FRECUENCIA H=18CM PISO 1

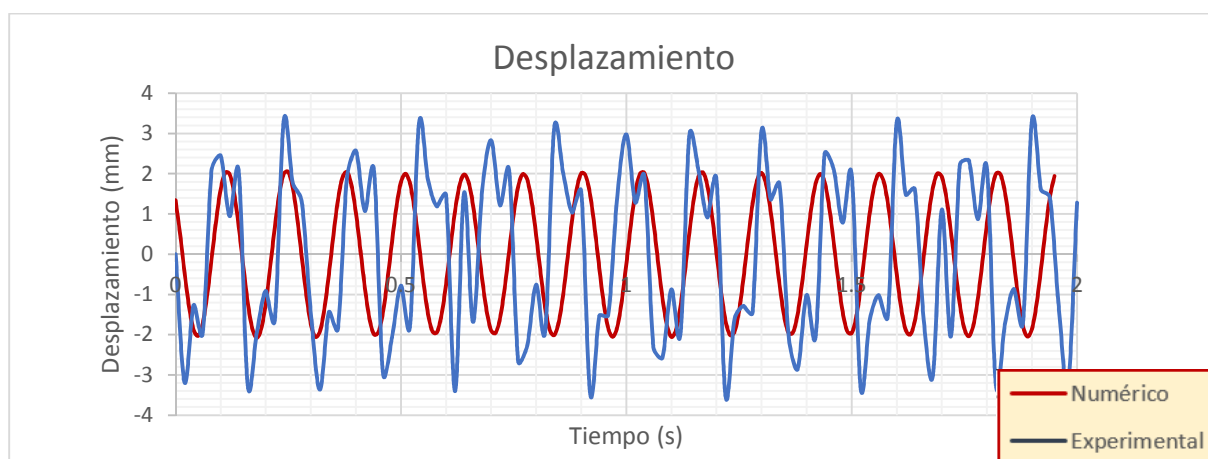


Figura 5.30: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, 1RA FRECUENCIA H=18CM PISO 1

Piso 2:

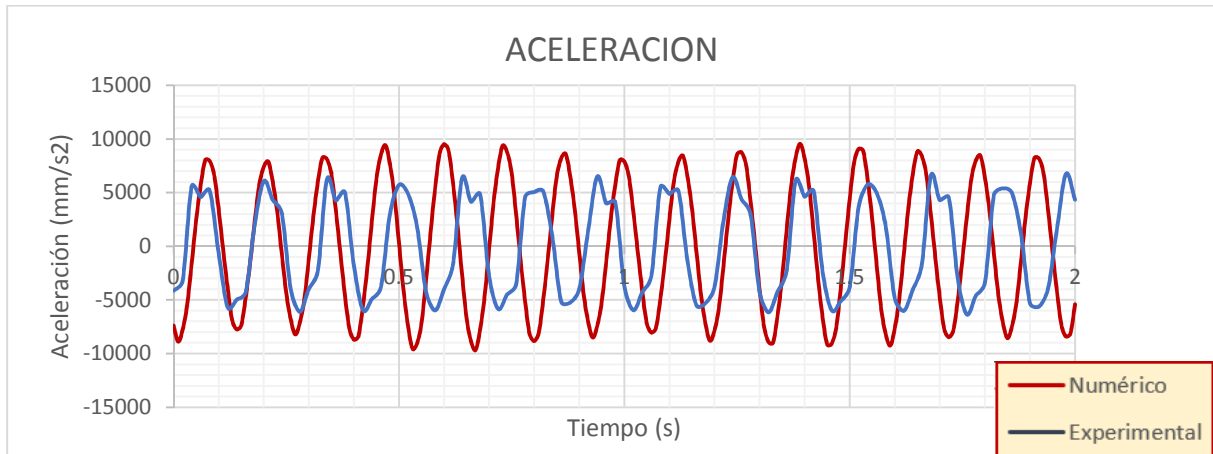


Figura 5.31: ACELERACIÓN MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, 1RA FRECUENCIA H=18CM PISO 2

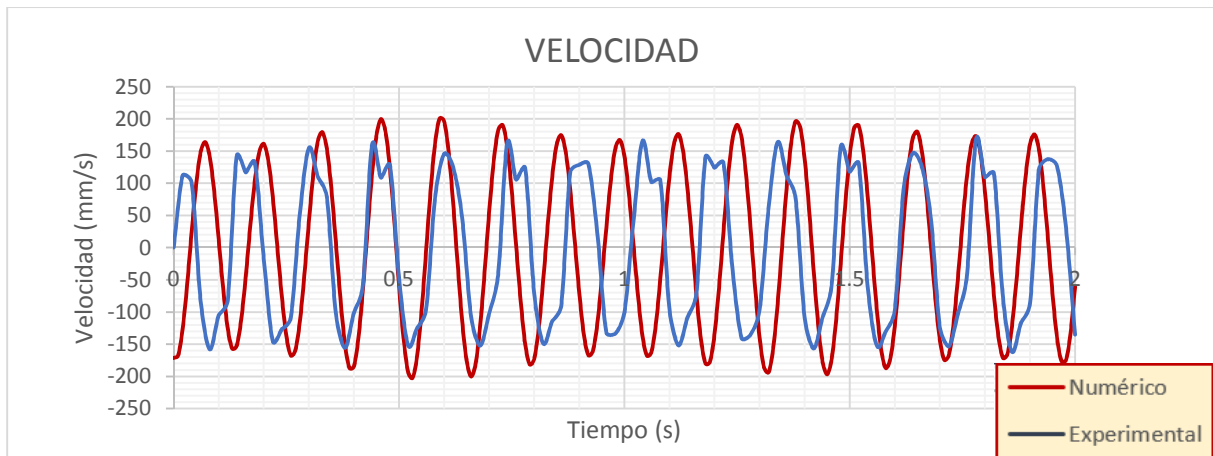


Figura 5.32: VELOCIDAD MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, 1RA FRECUENCIA H=18CM PISO 2



Figura 5.33: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, 1RA FRECUENCIA H=18CM PISO 2

Piso 3:

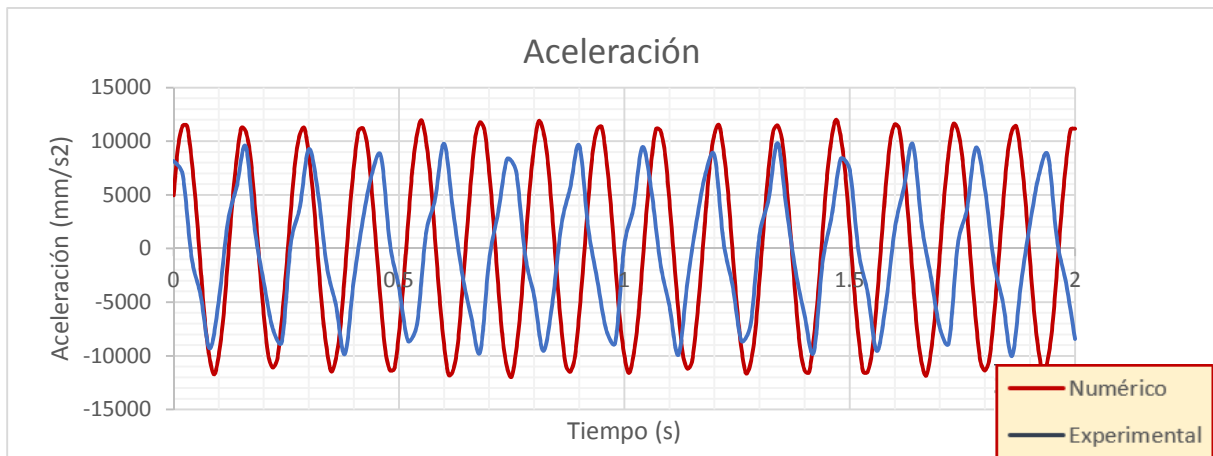


Figura 5.34: ACELERACIÓN MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, 1RA FRECUENCIA H=18CM PISO 3

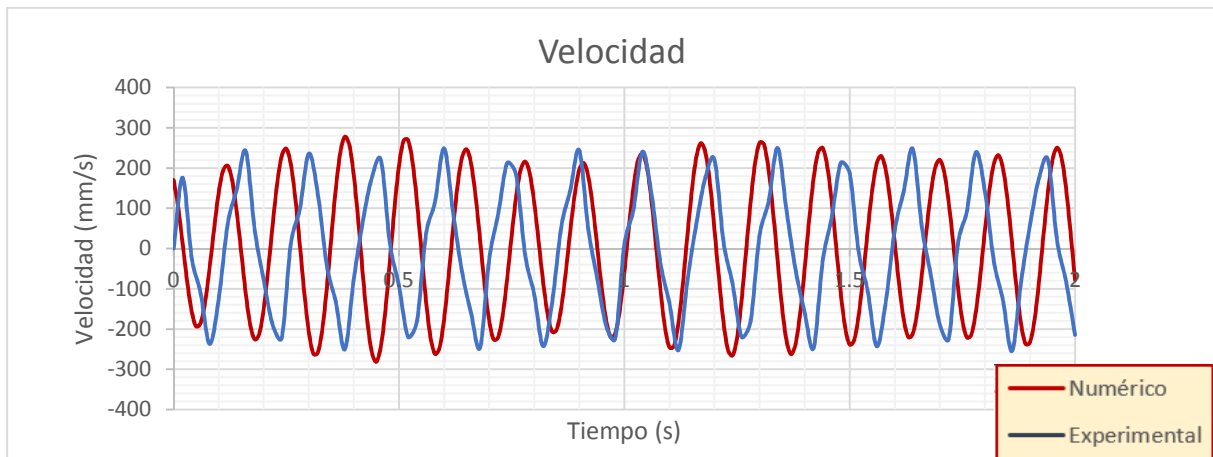


Figura 5.35: VELOCIDAD MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, 1RA FRECUENCIA H=18CM PISO 3



Figura 5.36: DESPLAZAMIENTO MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN VORZADA, 1RA FRECUENCIA H=18CM PISO 3

Se sintetiza los resultados en las tablas mostradas:

Tabla 5.7: COMPARACIÓN DE DATOS MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA EN FRECUENCIAS H=18cm

COMPARACION EN FRECUENCIA H=18cm				
Nº Frecuencia	Nº Piso	Frecuencia Digital (Hz)	Frecuencia Experimental(Hz)	% Aproximación
Primera Frecuencia	Piso 1	7.69	6.25	81.27
	Piso 2	7.69	6.25	81.27
	Piso 3	7.69	6.25	81.27

Las frecuencias obtenidas mostradas en la tabla 5.7 muestran convergencias encima del 80% por lo que se considera alta. En las tablas siguientes se muestra las respuestas en aceleraciones, velocidades y desplazamientos:

Tabla 5.7: COMPARACIÓN DE DATOS MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA EN ACELERACIONES H=18cm

COMPARACION EN ACELERACIONES H=18cm				
Nº Frecuencia	Nº Piso	Aceleración Digital (mm/s ²)	Aceleración Experimental (mm/s ²)	% Aproximación
Primera Frecuencia	Piso 1	4947.7	6107	81.02
	Piso 2	9540.64	7014	73.52
	Piso 3	13254.4	10011	75.53

Tabla 5.8: COMPARACIÓN DE DATOS MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA EN VELOCIDADES H=18cm

COMPARACION EN VELOCIDADES H=18cm				
Nº Frecuencia	Nº Piso	Velocidad Digital (mm/s)	Velocidad Experimental (mm/s)	% Aproximación
Primera Frecuencia	Piso 1	98.0763	136.13	72.05
	Piso 2	200.289	178.61	89.18
	Piso 3	277.845	254.93	91.75

Tabla 5.9: COMPARACIÓN DE DATOS MODAL DYNAMIC VS. VIBRACIÓN FORZADA EN DESPLAZAMIENTOS H=18cm

COMPARACION EN DESPLAZAMIENTOS H=18cm				
Nº Frecuencia	Nº Piso	Desplazamiento Digital (mm)	Desplazamiento Experimental (mm)	% Aproximación
Primera Frecuencia	Piso 1	2.04	3.03	67.34
	Piso 2	4.29	4.55	94.18
	Piso 3	5.89	6.49	90.68

Como ya se indicó se realizó la comparación para la primera frecuencia ya que sólo esta fue hallada en el ensayo de vibración libre.

5.4 STEADY STATE DYNAMIC – BARRIDO DE FRECUENCIAS

Para el análisis comparativo del barrido de frecuencias se presentan las amplitudes obtenidas del estado estacionario de la respuesta de la estructura, como ya se indicó por tratarse de un tiempo prolongado de aplicación de la carga.

5.4.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA EDIFICIO H=10cm

Para el edificio de H=10cm se tomaron todos los puntos de toma de datos, frecuencias como abscisas y amplitudes de desplazamiento como ordenadas en el caso experimental, y para el caso digital los puntos lo define el parámetro Bias y se muestran los siguientes resultados:

Piso 1:

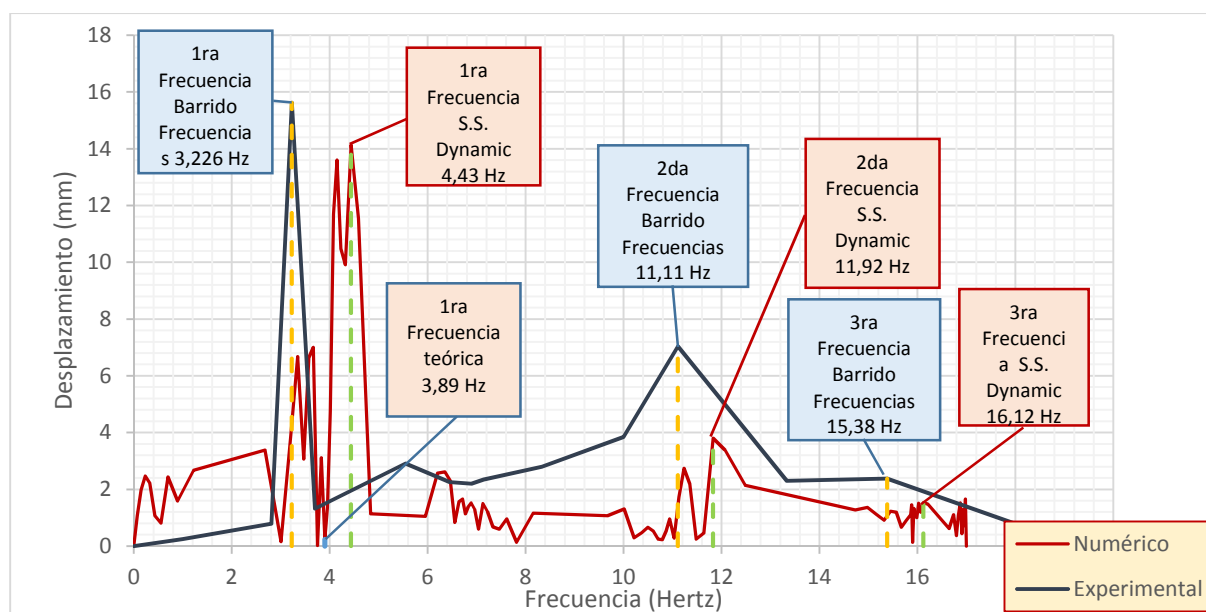


Figura 5.37: STEADY STATE DYNAMIC VS. BARRIDO DE FRECUENCIAS, PISO 1 H=10cm

Piso 2:

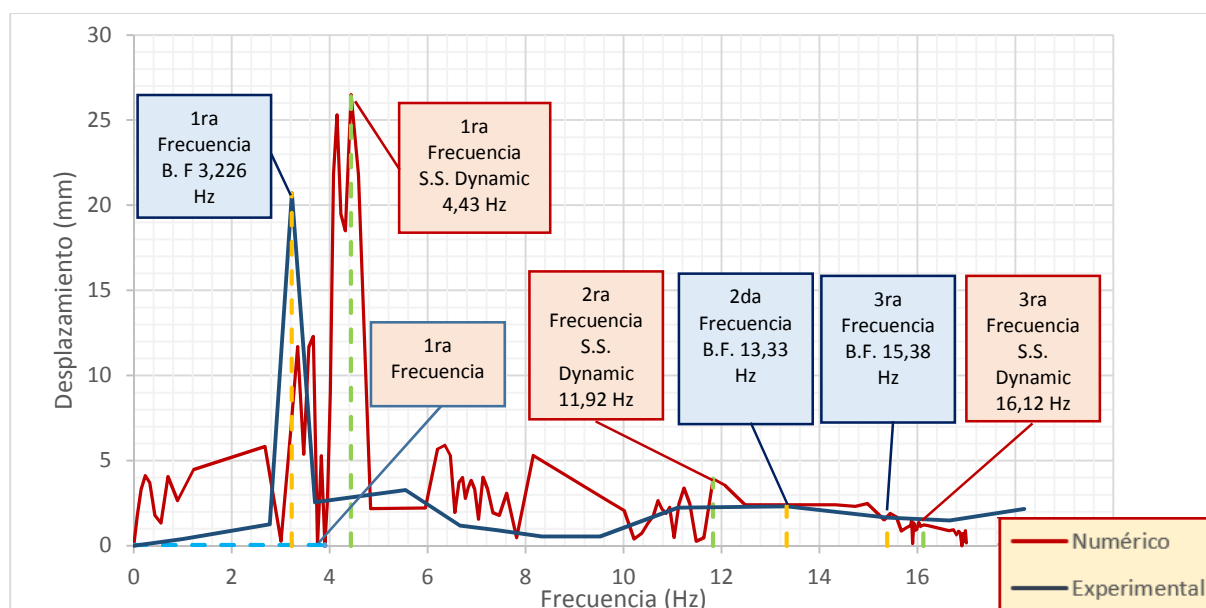


Figura 5.38: STEADY STATE DYNAMIC VS. BARRIDO DE FRECUENCIAS, PISO 2 H=10cm

Piso 3:

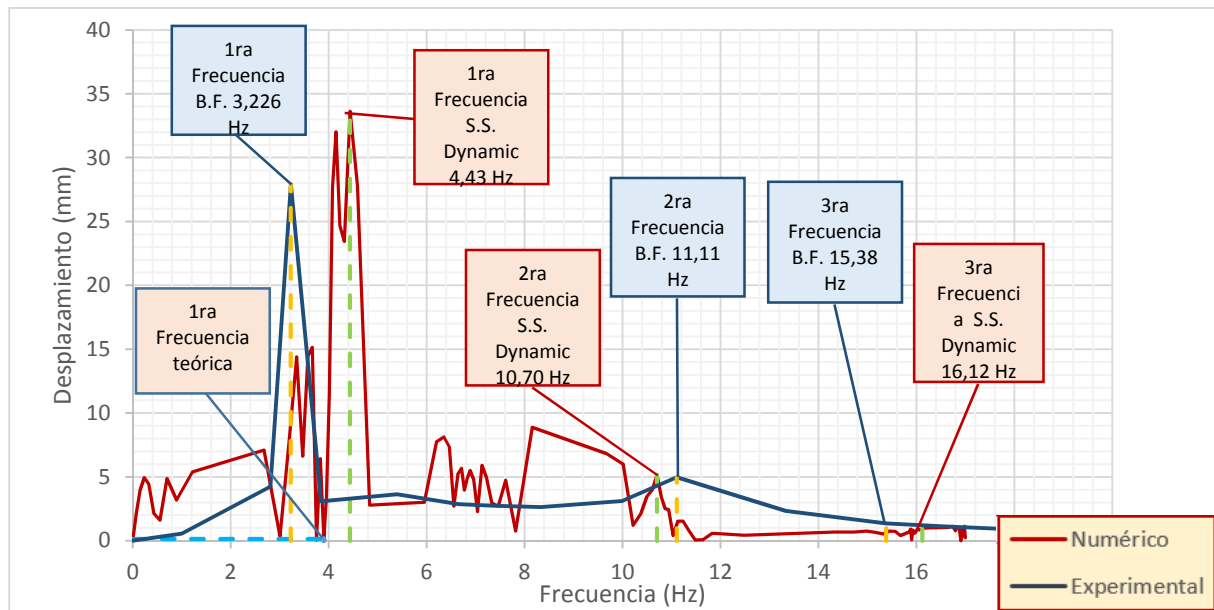


Figura 5.39: STEADY STATE DYNAMIC VS. BARRIDO DE FRECUENCIAS, PISO 3 H=10cm

Como se observa la diferencia entre la primera frecuencia propia experimental (3,226Hz) y la frecuencia hallada del análisis S.S.Dynamic (4,43Hz) es de 1,2 Hz entonces en este ensayo se tiene errores de $\pm 27\%$.

5.4.2 COMPARACION DE RESULTADOS PARA EDIFICIO H=18cm

Para el edificio de H=18cm los datos comparados son del barrido de frecuencias tomando como referencia solamente la primera frecuencia propia como sigue:

Piso 1:

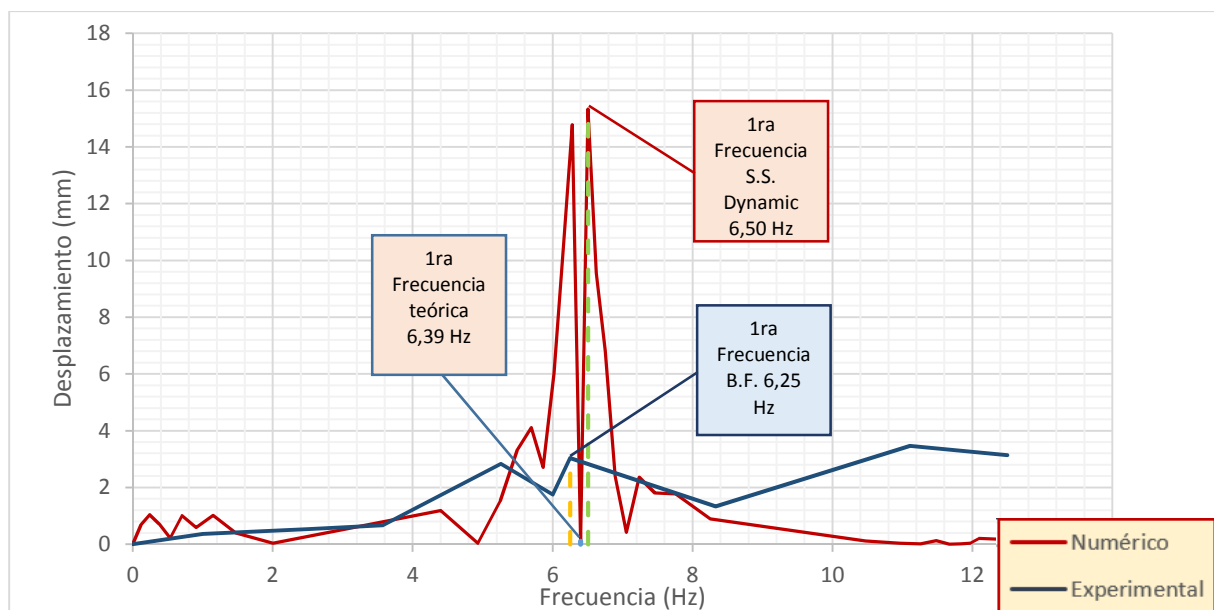


Figura 5.40: STEADY STATE DYNAMIC VS. BARRIDO DE FRECUENCIAS, PISO 1 H=18cm

Piso 2:

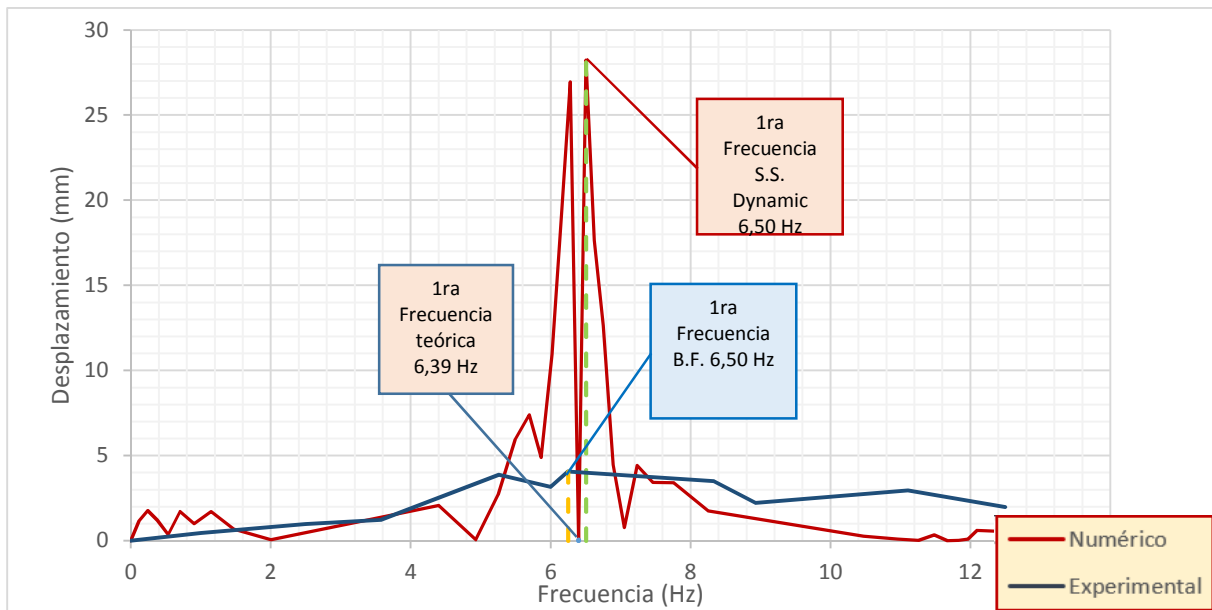


Figura 5.41: STEADY STATE DYNAMIC VS. BARRIDO DE FRECUENCIAS, PISO 2 H=18cm

Piso 3:

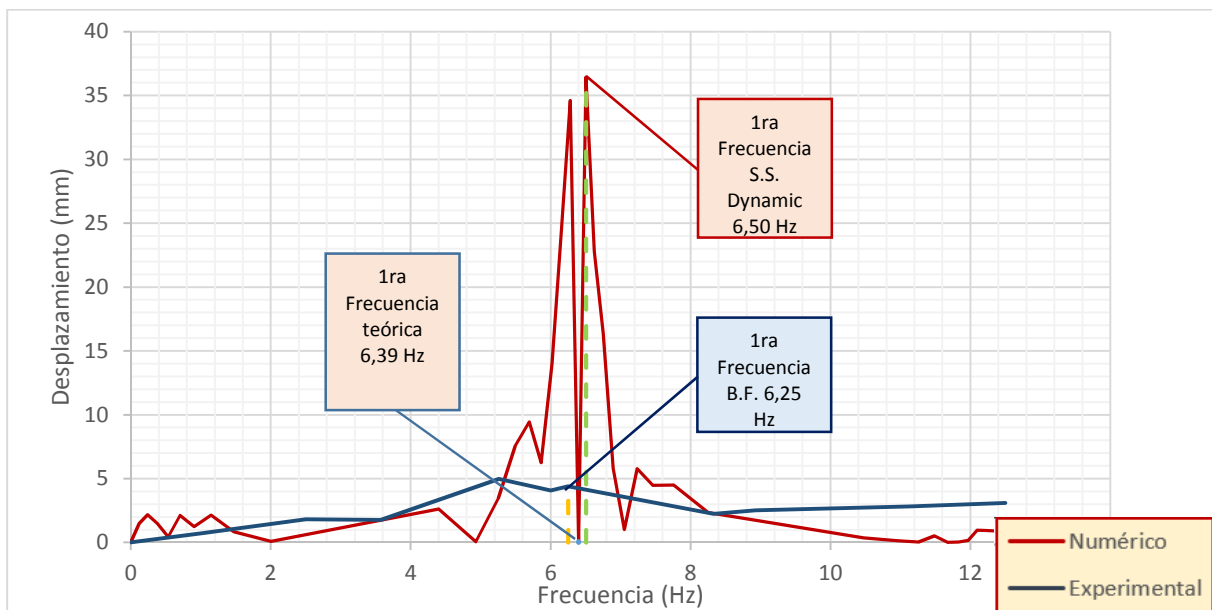


Figura 5.42: STEADY STATE DYNAMIC VS. BARRIDO DE FRECUENCIAS, PISO 3 H=18cm

Para el caso de esta comparación el mayor error se presenta en las amplitudes que se ven afectas por la razón de amortiguamiento en el caso experimental. Entonces estos errores de aproximación en amplitud se deben al porcentaje de amortiguamiento.

5.5 ANÁLISIS NUMÉRICO DE UN EDIFICIO A ESCALA REAL

Bajo la premisa que los anteriores análisis son correctos es que en este ítem se desarrolla en Abaqus un edificio de hormigón armado a escala real, los planos se adjuntan en el anejo 2. Se realiza para este edificio los tres procedimientos de análisis dinámico lineal planteado en Abaqus.

El edificio es de tres niveles no es simétrico y su desarrollo es como sigue:

5.5.1 GEOMETRÍA

La geometría es definida en el mismo software Abaqus según las dimensiones especificadas en los planos.

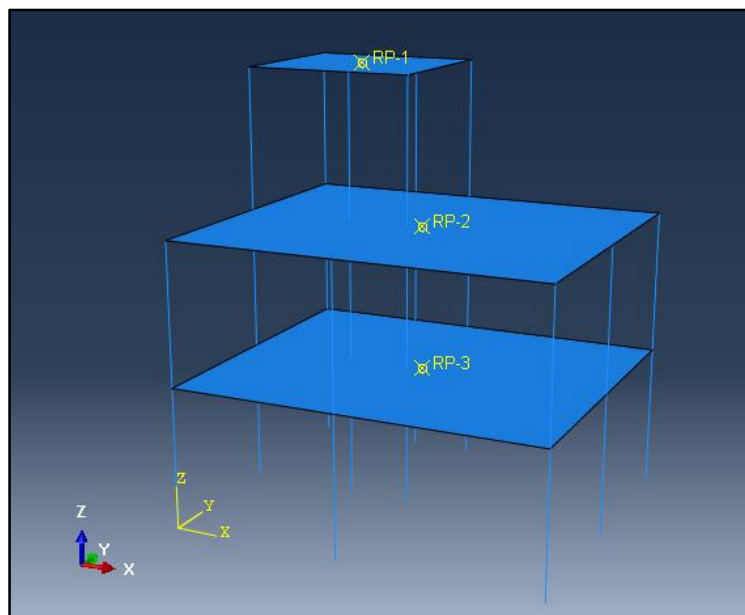


Figura 5.43: GEOMETRÍA DE EDIFICIO ESCALA REAL

En la figura 5.43 se muestra la geometría concluida.

Las condiciones de contorno fijadas son de base empotrada con todas las restricciones de los grados de libertad en la base.

5.5.2 MATERIALES

El material a utilizar para forjados y pilares es el hormigón armado con las siguientes características:

- Hormigón Armado: HA-25
- Módulo de elasticidad según EHE: 27264 N/mm^2
- Módulo de Poisson: 0,2
- Peso Unitario del HA: $2,357 \times 10^{-3} \text{ Tn/mm}^3$

Las masas por nivel son determinadas por:

- Peso propio de los forjados
- Sobrecarga de cada piso (según mediciones establecidas en el anejo 3)

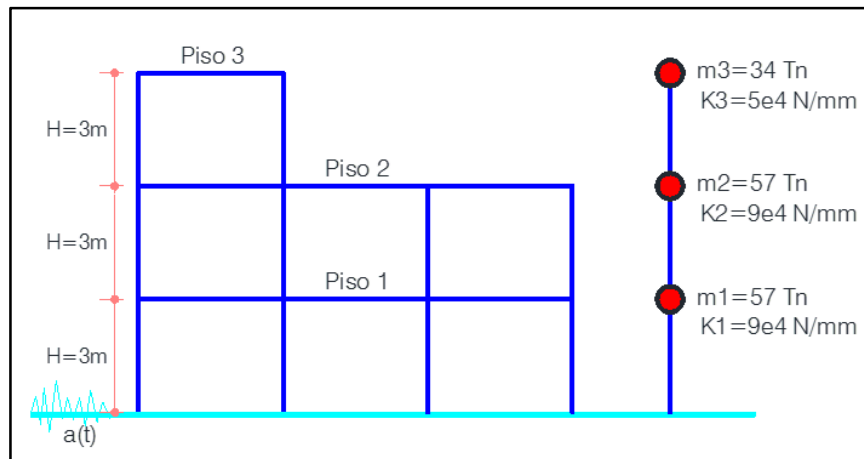


Figura 5.44: DEFINICIÓN DE PROPIEDADES GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS PARA EDIFICIO ESCALA REAL

Según lo determinado en el capítulo iv de análisis dimensional, las escalas de las propiedades geométricas y mecánicas son halladas con el edificio flexible de $H=10\text{cm}$ por haberse encontrado de éste las primeras frecuencias propias.

Longitud		Módulo de Elasticidad	
Piso 1, 2 y 3		Piso 1, 2 y 3	
longitud modelo	100 mm	Young modelo	1400 N/mm ²
longitud real	3000 mm	Young real	27264 N/mm ²
Escala	1/30	Escala	0.0513

Masa		Masa	
Piso 1 y 2		Piso 3	
masa modelo	0.00009 Ton	masa modelo	0.00009 Ton
masa real	57 Ton	masa real	34 Ton
Escala	1.579E-06	Escala	2.6471E-06

Rigidez		Rigidez	
Piso 1 y 2		Piso 3	
Rigidez modelo	0.267192455 N/mm	Rigidez modelo	0.267192455 N/mm
Rigidez real	89971.2 N/mm	Rigidez real	49075.2 N/mm
Escala	2.9698E-06	Escala	5.4446E-06

5.5.3 ANÁLISIS FREQUENCY – FRECUENCIAS PROPIAS

Con las características planteadas se realiza el procedimiento de extracción de frecuencias donde las primeras frecuencias propias longitudinales son:

- Primera frecuencia propia: eje y: 3,2016 Hz.
- Primera frecuencia propia: eje x: 3,4080 Hz.
- Segunda frecuencia propia: eje y: 9,0289 Hz.
- Segunda frecuencia propia: eje x: 9,0494 Hz.
- Tercera frecuencia propia: eje x: 14,497Hz.

Según el análisis dimensional la escala determinada para las frecuencias propias está dado

por: $\gamma_w^2 = \frac{\gamma_K}{\gamma_m}$

Entonces para el piso 1 y 2 la escala por análisis dimensional es **1,3714** y las escalas halladas en la modelización digital son:

1ra Frecuencia Propia		2da Frecuencia Propia	
Piso 1 y 2		Piso 1 y 2	
Frecuencia modelo	3.8979 Hz	Frecuencia modelo	10.94 Hz
Frecuencia real	3.2 Hz	Frecuencia real	9.0289 Hz
Escala	1.2181	Escala	1.2117

2da Frecuencia Propia	
Piso 1 y 2	
Frecuencia modelo	15.86 Hz
Frecuencia real	14.497 Hz
Escala	1.0940

La aproximación de las escalas entre análisis dimensional y análisis numérico es de 88%, entonces se puede comprobar solamente por análisis dimensional una escala preliminar de un modelo real.

5.5.4 ANALISIS MODAL DYNAMIC

Para el presente análisis se determinó un nuevo valor de escala para la amplitud de aceleración y con este se podrá comprobar y hallar los desplazamientos del edificio a escala real.

La carga impuesta a una misma escala de aceleraciones es la siguiente:

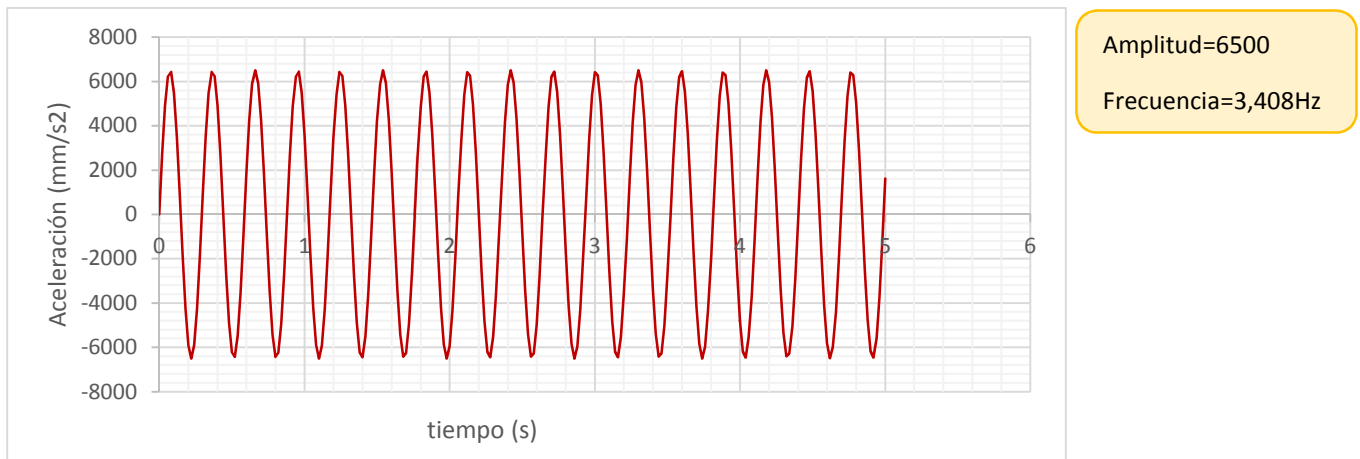


Figura 5.46: ACELERACIÓN APLICADA PARA PRIMERA FRECUENCIA PROPIA-EDIFICIO ESCALA REAL

Siendo la respuesta en desplazamientos tomada para el piso 3 el siguiente:



Figura 5.47: RESPUESTA EN DESPLAZAMIENTO DE FRECUENCIA PROPIA-EDIFICIO ESCALA REAL-PISO 1

Como se observa la amplitud en la figura 5.47 es de 100mm, este valor es comparado con el desplazamiento hallado en el piso 3 del edificio a escala.

Según el análisis dimensional la escala determinada para las frecuencias propias está dado por:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_a * \gamma_m}{\gamma_K}$$

Entonces para el piso 1 la escala por análisis dimensional es **0,53** y la escala hallada en la modelización digital es:

Desplazamiento 1ra frecuencia	
Piso 1	
Desplaz. modelo	15.8 mm
Desplaz. real	49.64 mm
Escala	0.3183

Para este caso la variación es mayor, sin embargo el valor de amplitudes en desplazamiento está afecto a la variación de la razón de amortiguamiento.

5.5.5 ANÁLISIS STEADY STATE DYNAMIC

Este análisis se realizó con carga actuante en la base en un grado de libertad a varias frecuencias determinándose así en que frecuencia se desarrolla las máximas amplitudes:

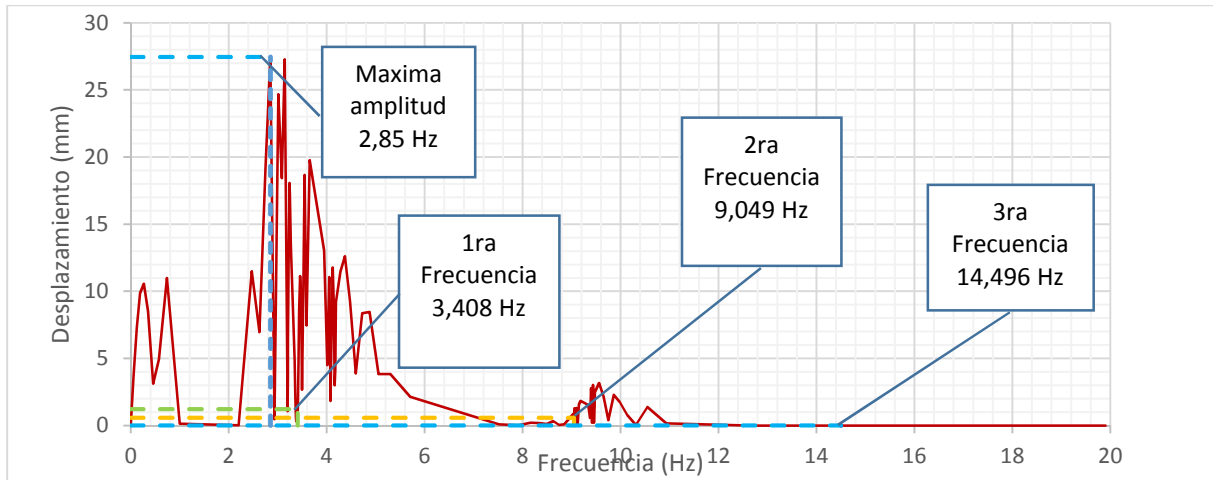


Figura 5.48: BARRIDO DE FRECUENCIA EDIFICIO ESCALA REAL-PISO 1

Como se observa en la figura 5.48 la máxima amplitud ocurre en una frecuencia de resonancia de 2,85Hz y no ocurre en la frecuencia propia del sistema. Esta variación es sensible a la carga exacta aplicada en la base.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo desarrollado ha permitido realizar diferentes observaciones relativas a la modelización numérica, la instrumentación con Arduino y el fenómeno físico estudiado. A continuación se detallan las mismas.

6.1 CONCLUSIONES RELATIVAS A LA MODELIZACION NUMÉRICA

- ABAQUS representa una herramienta de cálculo numérico dinámico por el método de elementos finitos muy eficaz, con gran aproximación a la representación de los fenómenos producidos por modelos reales, tal y como ha quedado demostrado en el presente trabajo con el modelo estudiado y los análisis dinámicos desarrollados.
- El módulo de “Lineal Perturbation” de ABAQUS presenta varios procedimientos de análisis dinámico lineal de estructuras, los procedimientos estudiados pertenecen a la solución por el método de análisis modal; y los resultados obtenidos tienen alta aproximación con la solución exacta de las ecuaciones de movimiento, y son computacionalmente más baratos; por tanto para fenómenos en el rango elástico lineal presenta los mejores resultados.

- El uso de elementos Shell y Beam por la simplicidad que presentan reducen el tiempo necesario de cálculo abaratando los costos computacionales, presentando resultados óptimos.
- La simplificación del modelo numérico en pórtico de cortante, utilizando la asignación "Body Rigid" a los forjados, reduce el tiempo de cálculo en ABAQUS, abaratando costos computacionales.

6.2 CONCLUSIONES RELATIVAS A LA INSTRUMENTACION CON ARDUINO

- Arduino es una herramienta que presenta muchas ventajas, principalmente su bajo costo, entre otras que es versátil, el hardware es pequeño por tanto fácil de usar y adaptar a diversos modelos para la obtención de datos, y existe amplia información en internet en diversos foros por usuarios que vienen desarrollando distintos procedimientos.
- En el presente estudio, aplicativo a dinámica estructural, arduino presenta muy bien las respuestas de la estructura estudiada; entonces para fines educativos Arduino tiene una gran aplicabilidad en la experimentación y con mayor estudio puede aplicarse a modelos de escala real.
- Existen una gran cantidad de instrumentación para la medición de respuestas estructurales pero aún no se registran experiencias con el uso de ARDUINO aplicado a Dinámica Estructural experimental.
- Para frecuencias bajas, los resultados presentados por la lectura con Arduino presentan una variación cuando llega a la máxima amplitud, variación que se atribuye a los errores de instrumentación que aún no queda demostrado.

6.3 CONCLUSIONES RELATIVAS AL FENÓMENO FÍSICO ESTUDIADO

- Con el objetivo de obtener una "estimación lineal adecuada" para un modelo del sistema dinámico estructural se deben reducir al mínimo las no linealidades en el sistema experimental excitado.
- Se plantean dos edificios uno flexible y otro rígido, el edificio flexible de $H=10\text{cm}$ con una rigidez K_F y una masa m_F ; el edificio rígido de $H=18\text{cm}$ con una rigidez $K_R = 26K_F$ y $m_R=8m_F$. Mientras más rígido sea el edificio estudiado, las respuestas tanto visuales como experimentales son difíciles de obtener y comprobar para una validación de datos.
- Del primer análisis del cálculo de frecuencias propias del sistema se concluye que la modelización numérica es muy aproximada a la modelización experimental mayores al 80% para el edificio flexible $H=10\text{cm}$ y para el edificio rígido $H=18\text{cm}$.

- Del segundo análisis de la historia en el tiempo de las respuestas dinámicas se concluye que la modelización digital es aproximada a la modelización experimental para ambos edificios según sus frecuencias propias. Las aproximaciones son mayores al 70% que es muy buena teniendo en cuenta los errores de instrumentación experimental.
- Del tercer análisis se concluye que las aproximaciones son mayores al 80% en el caso de frecuencias y amplitudes para el edificio de $H=10\text{cm}$; sin embargo para el edificio de $H=18\text{cm}$ existe buena aproximación solo en frecuencias, en amplitudes existe una variación alta, por tanto el sistema tiene mayor sensibilidad a las variaciones de instrumentación.
- El edificio de $H=10\text{cm}$ se convierte en “filtro de frecuencias” para frecuencias mayores a 20 Hertz; y el edificio de $H=18\text{cm}$ para frecuencias mayores a 30 Hertz.
- El máximo desplazamiento calculado numéricamente y experimentalmente se comprueba que es el correspondiente a la frecuencia propia más baja de ambos edificios.

6.4 FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACION

- Implementar un modelo numérico y experimental con un actuador colocado de manera inclinada que genere movimiento en la base en dos grados de libertad.
- Implementar un modelo numérico y experimental con un actuador que genere cargas lecturadas de un registro sísmico. Una experimentación con el uso de Arduino puede lograr la lectura del registro sísmico.
- Implementar el uso de Arduino para hallar las frecuencias naturales de estructuras a escala real existentes.
- Implementar el uso de pantalla Liquid Crystal Display (LCD) con Arduino para la lectura de datos al instante de ser generados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIBLIOGRAFÍA

- Villarreal 2009. "ANÁLISIS ESTRUCTURAL" Genner Villarreal Castro. Lima 2009.
- Barbat & Canet, 1994. "ESTRUCTURAS SOMETIDAS A ACCIONES SISMICAS, Cálculo por Ordenador" Segunda Edición, Alex H. Barbat – Juan Miquel Canet, Ediciones CIMNE. Barcelona 1994.
- García 1998. "DINÁMICA ESTRUCTURAL APLICADA AL DISEÑO SISMICO", Luis Enrique García Reyes. Bogotá 1998.
- Chopra 2014. "DINAMICA DE ESTRUCTURAS", cuarta edición, traducida al español, Anil K. Chopra, Ediciones Pearson.
- Clough & Penzien, 1995. "DYNAMICS OF STRUCTURES", Third edition, Ray W. Clough & Joseph Penzien. 1995.
- Paz, 1992. "DINAMICA ESTRUCTURAL: Teoría y Cálculo" Mario Paz, Editorial Reverté. 1992.
- Escudero, 2011: Tesis de Investigación: "Realización de una maqueta para el análisis de vibraciones", Pablo Escudero Puente, Barcelona 2011.
- Oller & Car, 1999. "RESPUESTA DINÁMICA DE LAS ESTRUCTURAS", Sergio Oller y Eduardo Car, Barcelona 1999.
- Mendes 2012. Tesis de Investigación: "Análise dinâmica de uma estrutura. Estudo numérico e experimental", Pedro Tiago De Freitas Mendes, Lisboa 2012.
- Rosenblueth 1992. "DISEÑO DE ESTRUCTURAS RESISTENTES A SISMOS", Emilio Rosenblueth IMCYC Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C, México, Editorial LIMUSA.
- Arduino LLC, 2013: "ARDUINO PROJECTS BOOK" Scott Fitzgerald y Michel Shiloh. Torino 2013.
- Blanco & Oller, n.d. "ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE ESTRUCTURAS" E. Blanco, S. Oller y Ll. Gil.
- Oñate, 1995. "CALCULO DE ESTRUCTURAS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS", Eugenio Oñate Ibáñez de Navarra. Barcelona 1995.

- Zienkiewicz, 2005. "EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS" Volumen 1, Traducida al español, O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor y J.Z. Zhu. Ediciones CIMNE. Barcelona 2005.
- Abaqus, n.d. "ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL", Volumen 1, 2, 3 y 4.
- Noy, 2013. Tesis de Investigación: "Programa didáctico a código abierto de análisis dinámico de estructuras UNDIN" Noy Hilarión, Francisco Leonardo. Bogotá 2013.
- Dinámica Estructural UPC, 2014. Apuntes del curso de master "DINÁMICA ESTRUCTURAL" de la Universidad Politécnica de Catalunya, Sergio Oller, Barcelona 2014.
- Uribe, 2012. Tesis de Investigación "Reproducción Numérica y Experimental del Proceso de Lanzamiento de un Puente Metálico por Empujes Sucesivos", Nicolás Uribe Sasiain. Barcelona 2012.
- Tejada 2011. Tesis de investigación: "Análisis Dinámico de Estructuras en el Dominio de la Frecuencia" Alejandro Miguel Tejada. Madrid 2011.
- San Bartolomé 1998. "ANÁLISIS DE EDIFICIOS", Ángel San Bartolomé, Fondo Editorial. Lima 1998.

Artículos

- Baran et al., 2011. "Construction and Performance Test of a Low-Cost Shake Table", T. Baran, A.K. Tanrikulu, C. Dunder, and A.H. Tanrikulu. Revista EXPERIMENTAL TECHNIQUES, Agosto 2011.
- Mayes et al., 2006 "What's Shakin' Dude? Effective use of modal Shakers", R.L. Mayes y A.J. Gomez. Revista EXPERIMENTAL TECHNIQUES, Julio 2006.
- Ramesh et al., 2013. "Experimental Determination of Wind-Induced Response on a Model of Natural Draught Cooling Tower", G. Ramesh, S. Selvi, P. Harikrishna, N. Lakshmanan, and S. Aranachlam. Revista SOCIETY FOR EXPERIMENTAL MECHANICS.

Enlaces Web:

- [W1] <http://www.jq.com.ar/Imagenes/Productos/Poliamida6/Poliam6/dtecnicos.htm>
- [W2] <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/pmma/documentacion/propiedades.htm>
- [W3] <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf>
- [W4] <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

- [W5] <https://proyectoarduino.wordpress.com>
- [W6] <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- [W7] <http://blog.bricogeek.com/noticias/tutoriales/tutorial-arduino-acelerometro-3-ejes-adxl335-3g/>
- [W8] <http://www.atmel.com/images/doc8161.pdf>
- [W9] <http://fritzing.org/home/>
- [W10] <https://www.youtube.com/watch?v=PghCyHjViEk>
- [W11] <https://www.youtube.com/watch?v=VXjeGJkefbs>

ANEJO -1

RUTINA EN MATLAB PARA LECTURA DE DATOS DE ARDUINO

(UPC, LABORATORIO DE MODELOS REDUCIDOS)

```
% MATLAB ACCELEROMETER DATA PRINTER
% This Program gathers the data recieved from the Xbee Explorer Serial Port
% (USB) and prints the results over time in a figure.

% Data from the 2-axis accelerometer is recieved this way:
%      X400Y500Z300T3000
%      X350Y450Z350T3050
%      ...

%% clear variables and figures
%clear all;
%clc;
close all;

%% SETTINGS -----
Tmax=20; % Total Data gathering time (seconds)
serialPort='COM5'; % Serial Port Number. Check every time in device manager
% (Mi Pc, boto dret, propiedades, administrador de dispositivos, puertos
COM) in Windows!
xZero=334; %Initial value for x (check)
yZero=329; %Initial value for y (check)
zZero=408; %Initial value for z (check)

% -----

%% DATA (DON'T CHANGE!!!)
maxValues=Tmax*100;
Ratio=3.220;
vToA=3.27;

%% Create serial object for Arduino.
s = serial(serialPort); % change the COM Port number as needed
set(s, 'InputBufferSize', 25); %number of bytes in inout buffer
set(s, 'FlowControl', 'none');
set(s, 'BaudRate', 9600);
set(s, 'Parity', 'none');
set(s, 'DataBits', 8);
set(s, 'StopBit', 1);
set(s, 'Timeout',100);
%% Connect the serial port to Arduino
fprintf('Setting program \n');
i = 0;

%Set the max number of values
data=repmat(char(0),maxValues,1); %Stores all data gathered
%data = repmat(cellstr(''), maxValues,1);

try
    fopen(s);
catch err
    fclose(instrfind);
    error('Make sure you select the correct COM Port where the Arduino is
connected.');
```

```
end

%% Create a figure window to monitor the live data
try

%% Read all data from Serial
tic % Start timer
fprintf('Setting finished: running program for:');
```

```

fprintf('%d seconds\n', Tmax);

while toc <= Tmax
    i = i + 1;
    %% Read buffer data
    temp=fgetl(s);
    data(i,1:length(temp))=temp;
end
fclose(s);
catch err
    fclose(s);
    fclose(instrfind);
    fprintf('ERROR: Serial Data gathering Failed. Run program again.');
```



```

end
fprintf('Data gathering finished. Total values: %d. Plotting. \n',i);
totalValues=i;
index=0; %Stores array position of X Data values
xValues=zeros(totalValues,1); %Stores numeric X values
yValues=zeros(totalValues,1); %Stores numeric Y values
zValues=zeros(totalValues,1); %Stores numeric Z values
t=zeros(totalValues,1); %Stores time for each sensor Reading

j=i;
Xposition=0;
Yposition=0;
Zposition=0;
Tposition=0;

lengthprev=0;
alpha='xyztXYZT1234567890';
for z=1:length(data(1,:))
    lengthprev=lengthprev+ismember(data(1,z),alpha);
end
lengthsig=0;
for i=1:1:j

%% Get proper values from the data and store it
    Xposition=0;
    Yposition=0;
    Zposition=0;
    Tposition=0;
    time=0;

    Xposition=strfind(data(i,:), 'X');
    Yposition=strfind(data(i,:), 'Y');
    Zposition=strfind(data(i,:), 'Z');
    Tposition=strfind(data(i,:), 'T');
    lengthprev=lengthsig;
    lengthsig=0;
    for z=1:length(data(i,:))
        lengthsig=lengthsig+ismember(data(i,z),alpha);
    end
    if i>1 && abs(lengthprev-lengthsig)<2
        if length(Xposition)==1 && length(Yposition)==1 && length(Zposition)==1
&& length(Tposition)==1
            if(Xposition==1 && Yposition~=0 && Zposition~=0 && Tposition~=0 &&
Zposition<Tposition && Yposition<Zposition && Xposition<Yposition)
                index=index+1;
                xValues(index)=str2double(data(i,Xposition+1:Yposition-1));
                yValues(index)=str2double(data(i,Yposition+1:Zposition-1));
                zValues(index)=str2double(data(i,Zposition+1:Tposition-1));
            end
        end
    end
end

```

```

        time=str2double(data(i,Tposition+1:end));
        t(index)=time/1000;
    end
end
end
end

%% Final plotting. Prints all the data gathered.
totalMod=zeros(index,1);
for i=1:index
    totalMod(i)=1/Ratio/vToA*sqrt((xValues(i)-xZero)^2+(yValues(i)-yZero)^2+(zValues(i)-zZero)^2);
    if(xValues(i)-xZero<0)
        totalMod(i)=-totalMod(i);
    end
end
figure('Name','Acceleració vs temps');
plot(t(1:index),totalMod(1:index));
acceleracio=totalMod(1:index);
temps=t(1:index);

clear i;
clear j;
clear serialPort;
clear time;
clear totalValues;
clear Yposition;
clear Xposition;
clear Zposition;
clear Tposition;
clear maxValues;
clear temp;
clear Tmax;
clear s;
clear xZero;
clear yZero;
clear zZero;
clear index;
clear Ratio;
clear vToA;
clear totalMod;
clear alpha;
clear lengthprev;
clear lengthsig;
clear t;
clear z;

xlswrite('ResultadosAcell.xlsx',temps,1,'B5:B3000');
xlswrite('ResultadosAcell.xlsx',xValues,1,'C5:C3000');
xlswrite('ResultadosAcell.xlsx',yValues,1,'D5:D3000');
xlswrite('ResultadosAcell.xlsx',zValues,1,'E5:E3000');

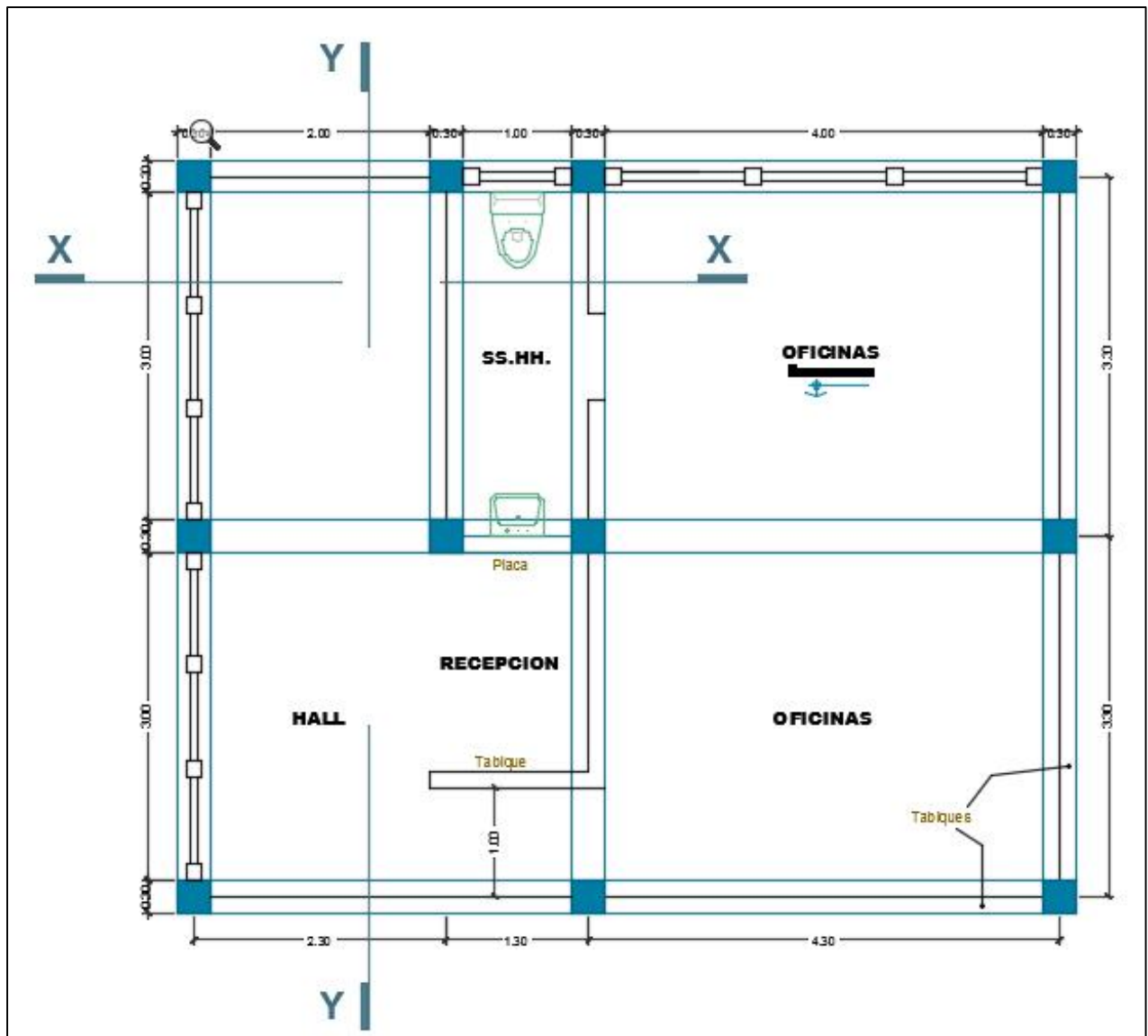
%[amplitud,velocidad, amortiguamientos,tAmortTotal,periodo] =
calculo_amplitud_amortiguamientos(acceleracio,temps)

```

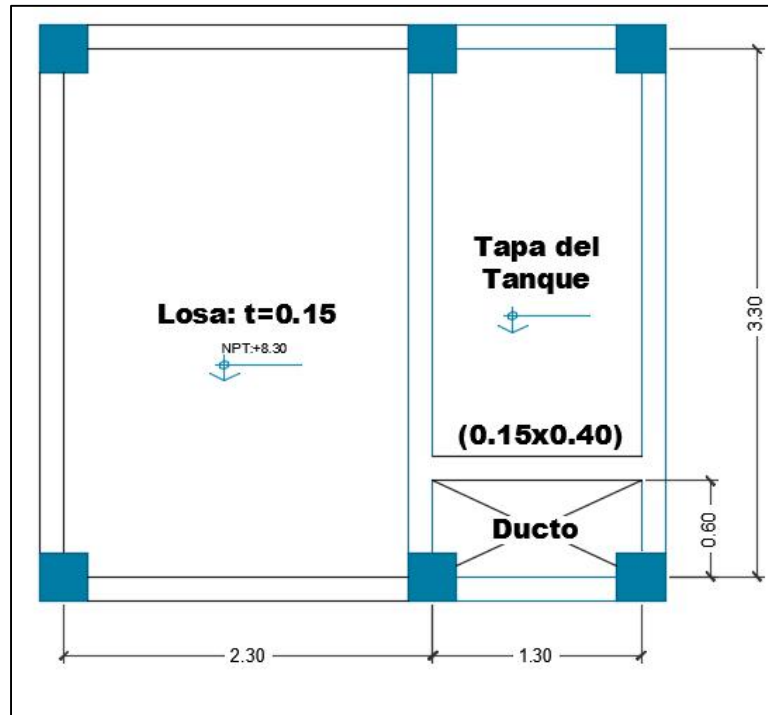
ANEJO -2

PLANO DEL MODELO A ESCALA REAL

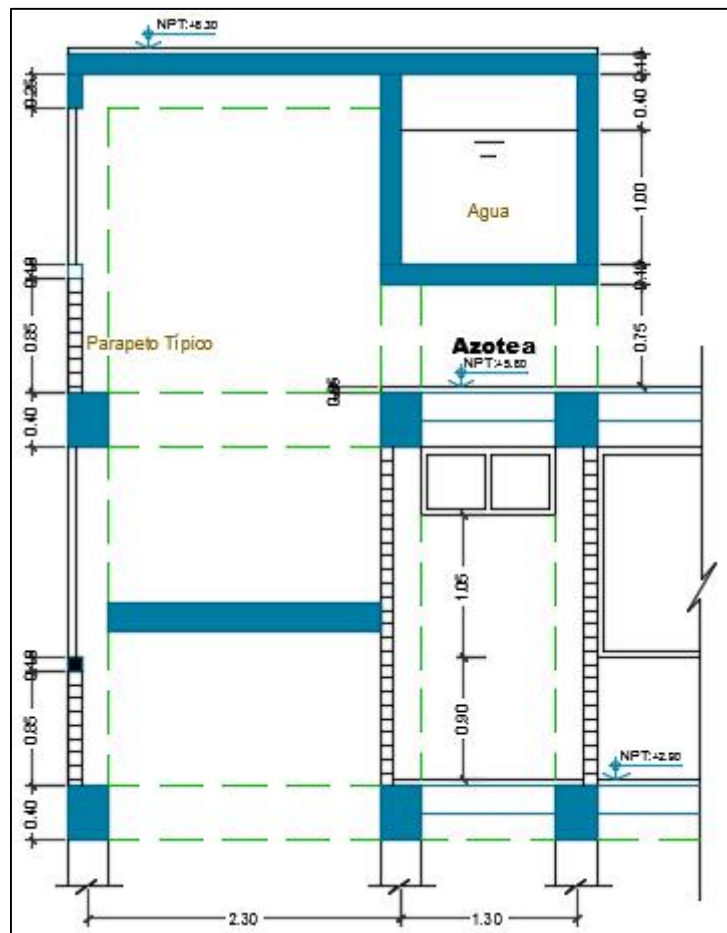
(SAN BARTOLOME, 1998)



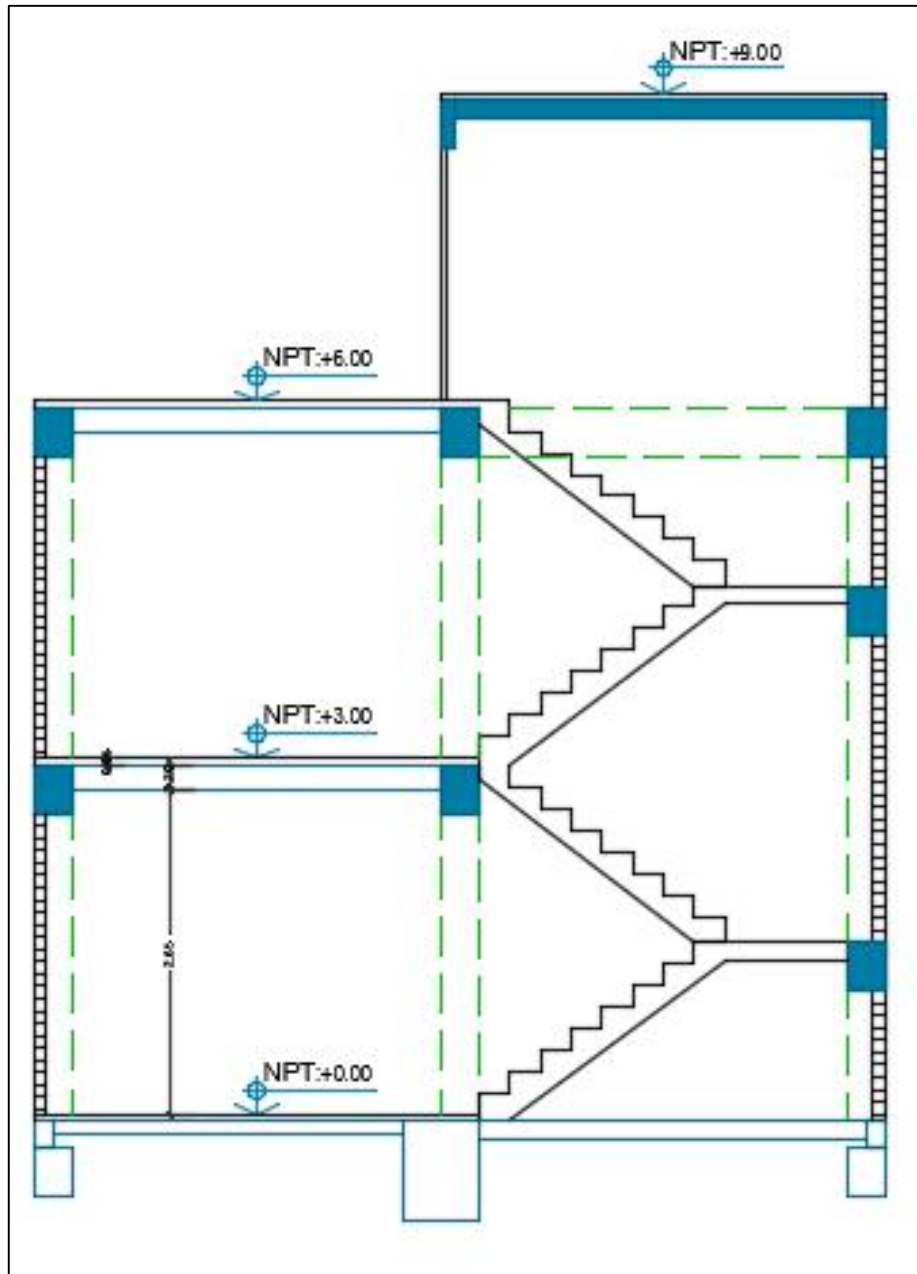
PLANTA DEL PRIMER Y SEGUNDO PISO S/E



PLANTA DEL TERCER PISO S/E



CORTE X-X S/E



CORTE Y-Y S/E

ANEJO -3

MEDICIONES DE CARGAS PARA EDIFICIO A ESCALA REAL

MASA CALCULADA PARA PISO 1 Y PISO 2

DATOS		PESO UNITARIO	UNIDAD	ÁREA	PESO (kg)
PISO 1 y 2					
Hormigón armado		2400	kg/m3		0
Agua		1000	kg/m3		0
Forjado macizo:	2400 x 0.15	360	Kg/m2		0
Forjado Aligerado (t=20cm)		300	Kg/m2	47.88	14364
Acabados 20 x 5		100	Kg/m2	47.88	4788
Tabiquería móvil en la zona de oficina		100	Kg/m2	7.6	760
Sobrecargas:	Oficinas y Baños (S.H.)	250	Kg/m2	30.09	7522.5
	Hall	400	Kg/m2	9	3600
	Azotea plana	100	Kg/m2		0
					0
Vigas:	30 x 60cm: 2400 x 0.30 x 0.6	432	Kg/m		0
	30 x 40cm: 2400 x 0.30 x 0.4	288	kg/m	46.6	13420.8
	15 x 40cm: 2400 x 0.15 x 0.4	144	kg/m		0
	15 x 10cm: 2400 x 0.15 x 0.1	36	kg/m	6	216
					0
Fábrica de ladrillo: 14 x 15		210	Kg/m2	33	6930
					0
Parapetos y	h= 0.95m: 210 x 0.85 + 36	215	kg/m	6	1290
Alféizar:	h= 2.00m: 210 x 1.90 + 36	435	kg/m (en S.H.)	8	3480
					0
Tabiques:	h= 2.7m: 210 x 2.7	567	kg/m		0
	h= 2.5m: 210 x 2.5	525	kg/m		0
	h= 2.3m: 210 x 2.3	483	kg/m		0
				TOTAL	56371.3

MASA CALCULADA PARA PISO 3

DATOS		PESO UNITARIO	UNIDAD	ÁREA	PESO (kg)
PISO 3					
Hormigón armado		2400	kg/m3	7.56	18144
Agua		0	kg/m3	6.21	0
Forjado macizo:	2400 x 0.15	360	Kg/m2	11.88	4276.8
Forjado Aligerado (t=20cm)		300	Kg/m2		
Acabados 20 x 5		100	Kg/m2		
Tabiquería móvil en la zona de oficina		100	Kg/m2		
Sobrecargas:	Oficinas y Baños (S.H.)	250	Kg/m2		
	Hall	400	Kg/m2		
	Azotea plana	100	Kg/m2	7.59	759
Vigas:	30 x 60cm: 2400 x 0.30 x 0.6	432	Kg/m		
	30 x 40cm: 2400 x 0.30 x 0.4	288	kg/m		
	15 x 40cm: 2400 x 0.15 x 0.4	144	kg/m	13.8	1987.2
	15 x 10cm: 2400 x 0.15 x 0.1	36	kg/m	7.9	284.4
Fábrica de ladrillo: 14 x 15		210	Kg/m2		
Parapetos y	h= 0.95m: 210 x 0.85 + 36	215	kg/m	7.9	1698.5
Alféizar:	h= 2.00m: 210 x 1.90 + 36	435	kg/m		
Tabiques:	h= 2.7m: 210 x 2.7	567	kg/m		
	h= 2.5m: 210 x 2.5	525	kg/m		
	h= 2.3m: 210 x 2.3	483	kg/m		
				TOTAL	27149.9